

Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde Tübingen

Abteilung Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Propädeutik

Ärztlicher Direktor: Professor Dr. H. Weber

Sektion Medizinische Werkstoffkunde und Technologie

Leiter: Professor Dr. J. Geis-Gerstorfer

**Einfluss von Molybdän und Wolfram auf das
Korrosionsverhalten zweier experimenteller
Kobalt-Chrom-Legierungen mit unterschiedlichem
Chromgehalt**

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde**

**der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität
zu Tübingen**

vorgelegt von

Ines Miriam Kästle

aus

Balingen

2014

Dekan:

Professor Dr. I. B. Autenrieth

1. Berichterstatter:

Professor Dr. J. Geis-Gerstorfer

2. Berichterstatter:

Professor Dr. J. Setz

Widmung

Meinen Eltern und meinem Bruder

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XVIII
1 Einleitung.....	1
2 Literaturübersicht	4
2.1 Dentallegierungen	4
2.2 Korrosion	7
2.2.1 Definition von Korrosion	7
2.2.2 Mechanismen der Korrosion	8
2.2.3 Korrosionsarten.....	11
2.2.4 Passivität	13
2.2.5 Einflussfaktoren auf Korrosion	16
2.2.6 Methoden zur Bestimmung der Korrosionsstabilität.....	17
2.3 Studien zu ähnlichen Fragestellungen	21
2.4 Aufgaben und Zielstellung.....	23
3 Material und Methode	25
3.1 Material.....	25
3.1.1 Auswahl der Legierungen (verwendete Prüfkörper).....	25
3.1.2 Auswahl des Elektrolyten.....	26
3.2 Methode	27
3.2.1 Elektrochemischer Test	27
3.2.2 Statischer Immersionstest.....	38

4	Ergebnisse	42
4.1	Ergebnisse der Elektrochemischen Korrosionsmessungen.....	42
4.1.1	Messkurven.....	42
4.1.2	Auswertung der Elektrochemischen Korrosionsmessungen	63
4.2	Ergebnisse des statischen Immersionstests.....	88
4.2.1	Analytische Auswertung der Elektrolytlösung	88
5	Diskussion	98
5.1	Diskussion von Material und Methodik	98
5.2	Diskussion der Ergebnisse	103
5.2.1	Diskussion der Ergebnisse des elektrochemischen Tests	103
5.2.2	Diskussion der Ergebnisse des statischen Immersionstests.....	113
5.2.3	Vergleich der Ergebnisse des statischen Immersionstest mit den Ergebnissen des elektrochemischen Tests.....	117
5.2.4	Vergleich der Ergebnisse in Bezug auf den PRE-Wert.....	118
5.2.5	Klinische Schlussfolgerung	119
6	Zusammenfassung	121
	Literaturverzeichnis	123
	Anhang	133

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

A	Ampere; Fläche
ASS	Atom-Absorptions-Spektroskopie
ASTM	American Society for Testing and Materials
aqua dest.	destilliertes Wasser
°C	Grad Celsius
d	Dicke
Δs	Dickenabnahme
E	Potential
EM-Legierung	Edelmetall-Legierung
EMF-Legierung	edelmetallfreie Legierung
F	Faraday-Konstante in AS/mol; $F=96485$ C/mol; Kraft
g	Gramm
h	Stunde
I	Strom
i	Stromdichte
ICP-OES	inductively coupled plasma optical emission spectrometry (optische Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas)
l	Liter

Abkürzungsverzeichnis

M	molare Masse
m	Milli
μ	Mikro
n	Nano; Anzahl der Prüfkörper
NEM-Legierung	Nichtedelmetall-Legierung
PC	Personal Computer
pH	pH-Wert
PRE	Pitting Resistance Equivalent (Wirksamkeit)
Q	durch die Anodenfläche geflossene Ladungsmenge C/cm ²
s	Sekunde
SCE	Saturated Calomel Electrode (Kalomelelektrode)
T	Temperatur
t	Zeit
V	Volt
z	elektrochemische Wertigkeit des korrodierten Materials

Verwendete Symbole

AE	Arbeitselektrode
A_{ges}	Ladungsmenge der integrierten Gesamtfläche
β_a	anodische Tafelkonstante
β_c	kathodische Tafelkonstante
Δ_m	abgeschiedene Masse in g

Abkürzungsverzeichnis

Δm_{Ages}	berechneter Massenverlust in [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] für die gesamte Fläche
$\Delta m_{\text{Analytisch}}$	analytisch bestimmter Massenverlust in [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$]
Δm_{Anteil}	berechneter Massenverlust in [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] für die gesamte Fläche reduziert auf den prozentualen Anteil des Elements an der gesamten Legierung
Δm_{Q1}	berechneter Massenverlust in [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] für Zone I (E _z -300 mV) → nach <i>Reclaru et al.</i>
Δm_{Q2}	berechneter Massenverlust in [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] für Zone II (300 mV-700 mV) → nach <i>Reclaru et al.</i>
Δm_{Q3}	berechneter Massenverlust in [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] für Zone III (700 mV-1000 mV) → nach <i>Reclaru et al.</i>
$\Delta m_{\text{Q1,Q2,Q3}}$	berechneter Massenverlust in [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] für Zone I bis Zone III → nach <i>Reclaru et al.</i>
Δm_{Q6}	berechneter Massenverlust in [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] für Zone III (E _z -900 mV) → nach <i>Maranche et al.</i>
df	Anzahl der Freiheitsgrade
E(-5)	Potential bei Stromdichte $10^{-5} \text{ A}/\text{cm}^2$
E(-6)	Potential bei Stromdichte $10^{-6} \text{ A}/\text{cm}^2$
E _{corr}	Ruhepotential bzw. Korrosionspotential

Abkürzungsverzeichnis

E_p	Durchbruchpotential bzw. Lochkorrosionspotential
E_{p-1}	Durchbruchpotential 1 bzw. Lochkorrosionspotential 1
E_{p-2}	Durchbruchpotential 2 bzw. Lochkorrosionspotential 2
E_{pp}	Passivierungspotential
E_z	Gleichgewichtspotential
GE	Gegenelektrode
Gl.	Gleichung
H_0	Nullhypothese
H_1	Alternativhypothese
$i_{(300\text{ mV})}$	Stromdichte beim Potential 300 mV
$i_{(300\text{ mV}+E_z)}$	Stromdichte beim Potential 300 mV bezogen auf das Gleichgewichtspotential
$i_{(500\text{ mV})}$	Stromdichte beim Potential 500 mV
i_c	kritische Passivierungsstromdichte
i_{corr}	Korrosionsstromdichte
i_p	Passivstromdichte
i_{p-1}	Stromdichte beim Durchbruchpotential E_{p-1}
i_{p-2}	Stromdichte beim Durchbruchpotential E_{p-2}
Me	Metall
Mw.	Mittelwert
n_A	Anzahl der Proben bei Stichprobe A

Abkürzungsverzeichnis

n_B	Anzahl der Proben bei Stichprobe B
n.b.	nicht berücksichtigt
n.s.	nicht signifikant
Q1	Ladungsmenge der integrierten Fläche I (E_z -300 mV) → nach <i>Reclaru et al.</i>
Q2	Ladungsmenge der integrierten Fläche II (300 mV-700 mV) → nach <i>Reclaru et al.</i>
Q3	Ladungsmenge der integrierten Fläche III (700 mV-1000 mV) → nach <i>Reclaru et al.</i>
Q6	Ladungsmenge der integrierten Fläche III (E_z -900 mV) → nach <i>Maranche et al.</i>
RE	Referenzelektrode
R_p	Polarisationswiderstand
s.	signifikant
Stabw. (s)	Standardabweichungen für Stichproben
s_A	Standardabweichung der Stichprobe A
s_B	Standardabweichung der Stichprobe B
s_G	gewichtete Standardabweichung
Sig.	Signifikanz
t_{err}	t-Wert errechnet
\bar{x}	Mittelwert

Elemente

Co	Kobalt
Cr	Chrom
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
Nb	Niob
P	Phosphor
S	Schwefel
Si	Silizium
Ti	Titan
W	Wolfram

Chemische Verbindungen

Ag ₂ S	Silbersulfid
CaCl ₂	Calciumchlorid
C ₃ H ₆ O ₃	Milchsäure
C ₂ H ₅ OH	Ethanol
FeCl ₃	Eisen(III)-chlorid
H ⁺	Proton
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
HCl	Salzsäure

Abkürzungsverzeichnis

KCl	Kaliumchlorid
K ₂ HPO ₄	Dikaliumhydrogenphosphat
KSCN	Kaliumthiocyanat
Na ₂ HPO ₄	Dinatriumhydrogenphosphat
Na ₂ S	Natriumsulfid
NaCl	Natriumchlorid
NaHCO ₃	Natriumhydrogencarbonat
OH ⁻	Hydroxid-Ion
O ₂	molekularer Sauerstoff
PdS	Palladiumsulfid
SiC	Siliciumcarbid

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Korrosionsarten in Anlehnung an Worch et al. [64].....	13
Abbildung 2:	Schematische Darstellung einer Stromdichte-Potential-Kurve	14
Abbildung 3:	Schematische Darstellung der Einflüsse verschiedener Legierungszugaben auf das Korrosionsverhalten eines passivierbaren Metalls anhand der Stromdichte-Potential-Kurve in Anlehnung an Roos et al. [79] und Schmidt [80].	15
Abbildung 4:	In Pallavit G eingebettete Prüfkörper	28
Abbildung 5:	Schematische Darstellung der Versuchseinrichtung.....	29
Abbildung 6:	Potentiostat links im Bild. Rechts ist die Korrosionszelle dargestellt, bestehend aus einer doppelwandigen elektrochemischen Messzelle mit Drei-Elektrodenanordnung.	30
Abbildung 7:	Schema einer potentiodynamisch gewonnenen Stromdichte-Potential-Kurve, die zeigt, wie die Parameter i_{corr} und E_p bestimmt wurden.	32
Abbildung 8:	ICP-OES Spektrometer Optima 4300 DV (Perkin-Elmer)	33
Abbildung 9:	Zonencoulometrie in Anlehnung an <i>Reclaru et al.</i> [76]	35
Abbildung 10:	Zonencoulometrie in Anlehnung an <i>Maranche et al.</i> [14].....	36
Abbildung 11:	Prüfkörper der Legierung Co-1	39
Abbildung 12:	Proben für den statischen Immersionstest.....	40
Abbildung 13:	Vergleich der Mittelwerte der Ruhepotentiale der vier experimentellen Legierungen Co-1 bis Co-4 in 0,9 % NaCl....	44
Abbildung 14:	Vergleich der Mittelwerte der Ruhepotentiale der experimentellen Legierungen Co-1 und Co-2 in 0,9 % NaCl...	45
Abbildung 15:	Vergleich der Mittelwerte der Ruhepotentiale der experimentellen Legierungen Co-3 und Co-4 in 0,9 % NaCl...	46

Abbildung 16: Vergleich der Mittelwerte der Ruhepotentiale der vier experimentellen Legierungen Co-1 bis Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	47
Abbildung 17: Vergleich der Mittelwerte der Ruhepotentiale der experimentellen Legierungen Co-1 und Co-2 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	48
Abbildung 18: Vergleich der Mittelwerte der Ruhepotentiale der experimentellen Legierungen Co-3 und Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	49
Abbildung 19: Vergleich der Mittelwerte der potentiodynamischen Messkurven der vier experimentellen Legierungen Co-1 bis Co-4 in 0,9 % NaCl.....	50
Abbildung 20: Vergleich der Mittelwerte der potentiodynamischen Messkurven der experimentellen Legierungen Co-1 und Co-2 in 0,9 % NaCl	51
Abbildung 21: Vergleich der Mittelwerte der potentiodynamischen Messkurven der experimentellen Legierungen Co-3 und Co-4 in 0,9 % NaCl	52
Abbildung 22: Vergleich der Mittelwerte der potentiodynamischen Messkurven der vier experimentellen Legierungen Co-1 bis Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	53
Abbildung 23: Vergleich der Mittelwerte der potentiodynamischen Messkurven der vier experimentellen Legierungen Co-1 und Co-2 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	54
Abbildung 24: Vergleich der Mittelwerte potentiodynamischen Messkurven der experimentellen Legierungen Co-3 und Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	55
Abbildung 25: Vergleich E_{corr} -Messungen (Mittelwerte aller experimenteller Legierungen) in beiden Elektrolyten.....	56

Abbildung 26:	Vergleich E_{corr} -Messungen der Mittelwerte der experimentellen Legierungen Co-1 und Co-2 in beiden Elektrolyten	57
Abbildung 27:	Vergleich E_{corr} -Messungen der Mittelwerte der experimentellen Legierungen Co-3 und Co-4 in beiden Elektrolyten	58
Abbildung 28:	Vergleich der potentiodynamischen Messkurven in beiden Elektrolyten	59
Abbildung 29:	Vergleich der Mittelwerte der potentiodynamischen Messkurven der experimentellen Legierungen Co-1 und Co-2 in beiden Elektrolyten	60
Abbildung 30:	Vergleich der Mittelwerte der potentiodynamischen Messkurven der experimentellen Legierungen Co-3 und Co-4 in beiden Elektrolyten	61
Abbildung 31:	Vergleich der Mittelwerte der potentiodynamischen Messkurven der experimentellen Legierungen Co-3 in beiden Elektrolyten.	62
Abbildung 32:	Vergleich der Mittelwerte der potentiodynamischen Messkurven der experimentellen Legierungen Co-4 in beiden Elektrolyten.	63
Abbildung 33:	Ruhepotentialwerte (E_{corr} nach 2h) in mV der vier experimentellen Legierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte	66
Abbildung 34:	Potentialwerte bei Stromdichte 10^{-6} mA/cm ² der vier experimentellen Legierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte	67
Abbildung 35:	Potentialwerte bei Stromdichte 10^{-5} mA/cm ² der vier experimentellen Legierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte	68

Abbildung 36: Gleichgewichtspotentialwerte (E_z) in mV der vier experimentellen Legierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte	69
Abbildung 37: Durchbruchpotentialwerte (E_p-1) und (E_p-2) in mV der vier experimentellen Le-gierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte	70
Abbildung 38: Stromdichte (i_p-1) und (i_p-2) in $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ beim Durchbruchpotential (E_p-1 und E_p-2) der vier experimentellen Legierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte .	71
Abbildung 39: Korrosionsstromdichte (i_{corr}) in mA/cm^2 der vier experimentellen Legierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte .	72
Abbildung 40: Stromdichte $i_{(300\text{ mV})}$ in $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ beim Potential 300 mV der vier experimentellen Legierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte	73
Abbildung 41: Stromdichte $i_{(300\text{ mV}+E_z)}$ in $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ beim Potential 300 mV bezogen auf das Gleichgewichtspotential der vier experimentellen Legierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte	74
Abbildung 42: Stromdichte $i_{(500\text{ mV})}$ in $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ beim Potential 500 mV der vier experimentellen Legierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte	75
Abbildung 43: Analytisch (ICP-OES) bestimmte Massenverluste für Legierung Co-1 in den beiden Elektrolyten 0,9 % NaCl und 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	76
Abbildung 44: Analytisch (ICP-OES) bestimmte Massenverluste für Legierung Co-2 in den beiden Elektrolyten 0,9 % NaCl und 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	77
Abbildung 45: Analytisch (ICP-OES) bestimmte Massenverluste für Legierung Co-3 in den beiden Elektrolyten 0,9 % NaCl und 0,1 M NaCl Milchsäure.....	78

Abbildung 46: Analytisch (ICP-OES) bestimmte Massenverluste für Legierung Co-4 in den beiden Elektrolyten 0,9 % NaCl und 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	79
Abbildung 47: Analytisch (ICP-OES) bestimmte Kobalt- und Chrom-Massenverluste für Legierung Co-1 bis Co-4 in den beiden Elektrolyten 0,9 % NaCl und 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	80
Abbildung 48: Kobaltmassenverlust für Legierung Co-1 in 0,9 % NaCl: analytisch bestimmter Kobaltmassenverlust ↔ berechneter Kobaltmassenverlust.....	83
Abbildung 49: Kobaltmassenverlust für Legierung Co-2 in 0,9 % NaCl: analytisch bestimmter Kobaltmassenverlust ↔ berechneter Kobaltmassenverlust.....	83
Abbildung 50: Kobaltmassenverlust für Legierung Co-3 in 0,9 % NaCl: analytisch bestimmter Kobaltmassenverlust ↔ berechneter Kobaltmassenverlust.....	84
Abbildung 51: Kobaltmassenverlust für Legierung Co-4 in 0,9 % NaCl: analytisch bestimmter Kobaltmassenverlust ↔ berechneter Kobaltmassenverlust.....	84
Abbildung 52: Kobaltmassenverlust für Legierung Co-1 in 0,1 M NaCl-Milchsäure: analytisch bestimmter Kobaltmassenverlust ↔ berechneter Kobaltmassenverlust	85
Abbildung 53: Kobaltmassenverlust für Legierung Co-2 in 0,1 M NaCl-Milchsäure: analytisch bestimmter Kobaltmassenverlust ↔ berechneter Kobaltmassenverlust	85
Abbildung 54: Kobaltmassenverlust für Legierung Co-3 in 0,1 M NaCl-Milchsäure: analytisch bestimmter Kobaltmassenverlust ↔ berechneter Kobaltmassenverlust	86
Abbildung 55: Kobaltmassenverlust für Legierung Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure: analytisch bestimmter Kobaltmassenverlust ↔ berechneter Kobaltmassenverlust	86

Abbildung 56:	Massenverlust von Legierung Co-1 in 0,1 M NaCl-Milchsäure	89
Abbildung 57:	aufsummierter Massenverlust von Legierung Co-1 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	90
Abbildung 58:	Massenverlust von Legierung Co-2 in 0,1 M NaCl-Milchsäure	91
Abbildung 59:	aufsummierter Massenverlust von Legierung Co-2 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	92
Abbildung 60:	Massenverlust von Legierung Co-3 in 0,1 M NaCl-Milchsäure	93
Abbildung 61:	aufsummierter Massenverlust von Legierung Co-3 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	94
Abbildung 62:	Massenverlust von Legierung Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure	95
Abbildung 63:	aufsummierter Massenverlust von Legierung Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	96
Abbildung 64:	Vergleich der Massenverluste von Legierung Co-1 bis Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	97
Abbildung 65:	Vergleich der aufsummierten Massenverluste von Legierung Co-1 bis Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	97
Abbildung 66:	Potentiodynamische Messkurven der vier Legierungen in beiden Elektrolyten bei $i_{(300\text{ mV})}$ und $i_{(500\text{ mV})}$	106
Abbildung 67:	Vergleich von $\Delta m_{Q1,Q2,Q3}$ und Δm_{Q6} am Beispiel der Legierung Co-3 in 0,1 M NaCl-Milchsäure	113
Abbildung 68:	Schema der Kurvenverläufe der drei Legierungstypen (Typ I, II und III) in Anlehnung an ISO 10271:2001 (E) [118]	114
Abbildung 69:	Gegenüberstellung der Massenverluste der vier untersuchten Legierungen in 0,1 M NaCl-Milchsäure	117
Abbildung 70:	Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h) der Prüfkörper der Legierung Co-1 in 0,9 % NaCl	135
Abbildung 71:	Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h) der Prüfkörper der Legierung Co-2 in 0,9 % NaCl	135

Abbildung 72: Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h) der Prüfkörper der Legierung Co-3 in 0,9 % NaCl	136
Abbildung 73: Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h) der Prüfkörper der Legierung Co-4 in 0,9 % NaCl	136
Abbildung 74: Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h) der Prüfkörper der Legierung Co-1 in 0,1 M NaCl-Milchsäure	137
Abbildung 75: Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h) der Prüfkörper der Legierung Co-2 in 0,1 M NaCl-Milchsäure	137
Abbildung 76: Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h) der Prüfkörper der Legierung Co-3 in 0,1 M NaCl-Milchsäure	138
Abbildung 77: Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h) der Prüfkörper der Legierung Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure	138
Abbildung 78: Potentiodynamische Messkurven der Prüfkörper der Legierung Co-1 in 0,9 % NaCl	139
Abbildung 79: Potentiodynamische Messkurven der Prüfkörper der Legierung Co-2 in 0,9 % NaCl	139
Abbildung 80: Potentiodynamische Messkurven der Prüfkörper der Legierung Co-3 in 0,9 % NaCl	140
Abbildung 81: Potentiodynamische Messkurven der Prüfkörper der Legierung Co-4 in 0,9 % NaCl	140
Abbildung 82: Potentiodynamische Messkurven der Prüfkörper der Legierung Co-1 in 0,1 M NaCl-Milchsäure	141
Abbildung 83: Potentiodynamische Messkurven der Prüfkörper der Legierung Co-2 in 0,1 M NaCl-Milchsäure	141
Abbildung 84: Potentiodynamische Messkurven der Prüfkörper der Legierung Co-3 in 0,1 M NaCl-Milchsäure	142
Abbildung 85: Potentiodynamische Messkurven der Prüfkörper der Legierung Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure	142

Abbildung 86: Vergleich E_{corr} -Messungen (Mittelwerte aller experimenteller Legierungen) in beiden Elektrolyte..... 143

Abbildung 87: Vergleich der potentiodynamischen Messkurven (Mittelwerte aller experi-menteller Legierungen) in beiden Elektrolyte 143

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Chemische Zusammensetzung der verwendeten Legierungen in Gewichtsprozent, sowie die jeweiligen berechneten PRE-Werte.....	25
Tabelle 2:	„Künstliche Speichel“ für Korrosionsprüfungen von metallischen Dentallegierungen [106].....	26
Tabelle 3:	zeitlicher Ablauf des statischen Immersionstests.....	41
Tabelle 4:	Parameterauswertung der potentiodynamischen Messkurven in Anlehnung an DIN EN ISO 10271:2011 [47] im Elektrolyten 0,9 % NaCl.....	64
Tabelle 5:	Parameterauswertung der potentiodynamischen Messkurven in Anlehnung an DIN EN ISO 10271:2011 [47] im Elektrolyten 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	65
Tabelle 6:	Ergebnisse des t-Testes: Kobaltmassenverlust: analytischer Wert / berechnete Werte auf die Gesamtfläche bezogen.....	87
Tabelle 7:	Ergebnisse des t-Testes: Kobaltmassenverlust: analytischer Wert / berechnete Werte auf den Legierungsanteil reduziert ..	88
Tabelle 8:	Vergleich Δm_{Anteil} mit $\Delta m_{\text{Analytisch}}$ in beiden Elektrolyten für das Element Kobalt.....	111
Tabelle 9:	Oberflächenzustand der Legierungen vor dem statischen Immersionstest.....	133
Tabelle 10:	Messprotokoll statischer Immersionstest	134
Tabelle 11:	Datenwerte Korrosionsprotokoll für Legierung Co-1 in 0,9 % NaCl.....	144
Tabelle 12:	Datenwerte Korrosionsprotokoll für Legierung Co-2 in 0,9 % NaCl.....	145
Tabelle 13:	Datenwerte Korrosionsprotokoll für Legierung Co-3 in 0,9 % NaCl.....	146

Tabelle 14:	Datenwerte Korrosionsprotokoll für Legierung Co-4 in 0,9 % NaCl.....	147
Tabelle 15:	Datenwerte Korrosionsprotokoll für Legierung Co-1 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	148
Tabelle 16:	Datenwerte Korrosionsprotokoll für Legierung Co-2 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	149
Tabelle 17:	Datenwerte Korrosionsprotokoll für Legierung Co-3 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	150
Tabelle 18:	Datenwerte Korrosionsprotokoll für Legierung Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	151
Tabelle 19	Analytische Auswertung für Legierung Co-1 in 0,9 % NaCl bzw. 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	152
Tabelle 20:	Analytische Auswertung für Legierung Co-2 in 0,9 % NaCl bzw. 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	153
Tabelle 21:	Analytische Auswertung für Legierung Co-3 in 0,9 % NaCl bzw. 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	154
Tabelle 22:	Analytische Auswertung für Legierung Co-4 in 0,9 % NaCl bzw. 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	155
Tabelle 23:	Massenverluste der Elemente der Legierung Co-1 in 0,9 % NaCl.....	156
Tabelle 24:	Massenverluste der Elemente der Legierung Co-2 in 0,9 % NaCl.....	157
Tabelle 25:	Massenverluste der Elemente der Legierung Co-3 in 0,9 % NaCl.....	158
Tabelle 26:	Massenverluste der Elemente der Legierung Co-4 in 0,9 % NaCl.....	159
Tabelle 27:	Massenverluste der Elemente der Legierung Co-1 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	160

Tabelle 28:	Massenverluste der Elemente der Legierung Co-2 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	161
Tabelle 29:	Massenverluste der Elemente der Legierung Co-3 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	162
Tabelle 30:	Massenverluste der Elemente der Legierung Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure.....	163
Tabelle 31:	Zusammenstellung der t-Test-Ergebnisse aus der statistischen Auswertung in 0,9 % NaCl auf Gesamtfläche bezogen.....	164
Tabelle 32:	Zusammenstellung der t-Test-Ergebnisse aus der statistischen Auswertung in 0,9 % NaCl auf Legierungsanteil reduziert	164
Tabelle 33:	Zusammenstellung der t-Test-Ergebnisse aus der statistischen Auswertung in 0,1 M NaCl-Milchsäure auf Gesamtfläche bezogen	165
Tabelle 34:	Zusammenstellung der t-Test-Ergebnisse aus der statistischen Auswertung in 0,1 M NaCl-Milchsäure auf Legierungsanteil reduziert	165
Tabelle 35:	Messergebnisse und Standardabweichungen der Legierung Co-1 im statischen Immersionstest	166
Tabelle 36:	Messergebnisse und Standardabweichungen der Legierung Co-2 im statischen Immersionstest	167
Tabelle 37:	Messergebnisse und Standardabweichungen der Legierung Co-3 im statischen Immersionstest	168
Tabelle 38:	Messergebnisse und Standardabweichungen der Legierung Co-4 im statischen Immersionstest	169

1 Einleitung

Ziel der zahnärztlichen Tätigkeit ist der Erhalt oder die Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit des orofazialen Systems.

Dazu stehen heute eine Vielzahl unterstützender Werkstoffe als Hilfsmittel zur Verfügung [1]. Zu nennen wären hier insbesondere die Legierungen, da sie in den verschiedenen Fachgebieten der Zahnmedizin zur Anwendung kommen. So werden z.B. in der Prothetik Legierungen zur Herstellung von Kronen, Brücken, Modellgussprothesen und endodontischen Stiften benötigt. In der konservierenden Zahnheilkunde werden Legierungen für plastische und vergießbare Füllungsmaterialien verwendet, während in der Kieferorthopädie Legierungen zur Herstellung von Bändern, Drähten und Schrauben benötigt werden. In einem weiteren Fachgebiet, der Chirurgie, kommen Legierungen in Form von Implantaten und Osteosynthesematerialien zur Anwendung [2].

Aufgrund ihres vielfältigen Verwendungszweckes werden an die verwendeten Dentallegierungen aus medizinischer und biologischer Sicht besonders hohe Anforderungen gestellt. So müssen klinisch angewendete Dentalmaterialien physikalisch-werkstoffkundlichen Anforderungen genügen und biokompatibel sein [1]. Der Begriff „Biokompatibilität“, was so viel wie biologische Verträglichkeit heißt, kann für ein Material, welches in eine physiologische biologische Umgebung gebracht wird, so definiert werden, dass dieses Material keine (signifikanten) schädlichen Einflüsse auf den lebenden Organismus ausübt, aber auch umgekehrt dessen Umgebung nicht das Material angreift [3], [4].

Neben der Biokompatibilität spielen bei der Auswahl geeigneter Materialien auch ökonomische Aspekte eine Rolle [1]. Denn so kommen durch restriktive Finanzierungen von Materialkosten für Zahnersatz durch die Kassen und die zunehmende Belastung der Patienten durch Selbstbeteiligung, sowie steigende Rohstoffpreise für Edelmetalllegierungen [5], [6], zunehmend Nichtedelmetall-(NEM-) Legierungen zum Einsatz [7].

Allerdings sind in der Mundhöhle nur Legierungen mit einem ausreichenden Edelmetallgehalt oder solche NEM-Legierungen, die eine hinreichend stabile,

passivierende Oxidschicht bilden, korrosionsbeständig[8]. Daher nimmt auch, in Anbetracht des steigenden Einsatzes der NEM-Legierungen in der Zahnheilkunde, die Bedeutung der Korrosionsuntersuchungen ständig zu [9].

Denn Korrosionsvorgänge können die Funktion des Werkstoffs beeinträchtigen. Korrodiert z.B. eine Lötstelle, so kann dies dazu führen, dass die Füge­stelle mit der Zeit so weit geschwächt wird, dass es zur Fraktur des Bauteils kommt.

Weiterhin können Korrosionsvorgänge auch zu rauen Oberflächen und un­schönen Verfärbungen an Legierungsoberflächen führen, so dass nicht nur das ästhetische Erscheinungsbild beeinträchtigt wird, sondern auch Retentions­stellen für Plaque entstehen [1], [10].

Doch Qualitätsminderungen der Werkstoffe sind nicht die einzigen möglichen Folgen der Korrosion. So können galvanische Korrosionsphänomene zu Metall­geschmack und Schmerzen führen [11].

Ferner verbindet sich in biologischen Umgebungen, wie beispielsweise der Mundhöhle, das Problem der Korrosion mit dem Problem der Biokompatibilität [12], [13]. Durch die anfallenden Korrosionsprodukte kann es nämlich zu ge­undheitlichen Beeinträchtigungen, wie Gingivitis, lichenoiden Reaktionen oder Schleimhautnekrosen, des Patienten kommen [14]. Denn Metalle wie Nickel, Kobalt und Chrom werden mit Hypersensibilität, Toxizität und Kanzerogenität in Verbindung gebracht, wohingegen die daraus gefertigten NEM-Legierungen, sofern sie ausreichend hohe Chrom- und Molybdängehalte aufweisen, als biokompatibel angesehen werden, da es bisher keinen klinischen Anhaltspunkt dafür gibt, dass aus Dentallegierungen herausgelöste Bestandteile toxisch oder kanzerogen wirken [15]. Allerdings können beim Korrosionsvorgang gelöste Metallbestandteile u.U. in eine Wechselwirkung mit lebendem Gewebe treten und so Allergien auslösen [2]. Dabei sind durch Abgabe von Metallionen verur­sachte allergische Reaktionen aus zwei Gesichtspunkten bedeutsam. Denn so kann ein Patient, der bereits sensibilisiert ist, infolge einer Metallauf­lösung Reaktionen zeigen, wohingegen bei einem nicht sensibilisierten Patienten die Gefahr besteht, dass er sensibilisiert wird [1].

Die Gefahr, dass allergische Reaktionen auftreten, besteht insbesondere bei den NEM-Legierungen (Nickel, Kobalt, Chrom, Beryllium). Die häufigsten im

Epikutantest nachweisbaren allergischen Reaktionen findet man bei Nickellegierungen, gefolgt von Kobalt-Chrom-Molybdän- und quecksilberhaltigen Palladiumlegierungen [16].

Auch wenn eine Sensitivität gegenüber Kobalt und Chrom im Vergleich zu Nickel seltener anzutreffen ist [17], kann man dennoch davon ausgehen, dass beim Vorliegen einer Nickelallergie, v.a. bei Frauen, in vielen Fällen auch eine Überempfindlichkeit gegenüber Kobalt anzutreffen ist. Bei Männern findet man hingegen bei einer Kobalt-Überempfindlichkeit häufig auch eine Überempfindlichkeit gegenüber Chrom [8], [18].

Treten allergische Reaktionen auf, variiert die klinische Symptomatik von lokalen Schleimhautreaktionen bis zur Entwicklung von Fernsymptomen (z.B. Rhinorrhoe) und generalisierten Erscheinungen (z.B. Ekzem) [16].

Doch Korrosionsprodukte können nicht nur allergische Reaktionen auslösen, sie können auch die Kariesentstehung fördern, da sie den Widerstand von Dentin und Schmelz gegenüber Karies verringern können [12].

Zusammenfassend kann gesagt werden dass, obwohl NEM-Legierungen nicht so korrosionsstabil wie Edelmetalllegierungen sind, NEM-Legierungen (v.a. Kobalt-Chrom-Legierungen), insbesondere aufgrund ökonomischer Aspekte, immer mehr an Bedeutung gewinnen.

Allerdings sollte versucht werden die Nachteile, die sich aufgrund der verminderten Korrosionsresistenz ergeben, zu minimieren. Da dies eventuell durch eine geeignete Legierungszusammensetzung geschehen kann, besteht das Ziel dieser Dissertation zu untersuchen, in wieweit sich die zu untersuchenden Legierungen bezüglich ihrer Korrosionsresistenz für den praktischen Einsatz eignen.

2 Literaturübersicht

2.1 Dentallegierungen

Reine Metalle zeigen oft nicht die für die meisten Anwendungen in der Zahnmedizin erforderlichen Eigenschaften. Als elementare Metalle werden derzeit nur Gold (Galvano-Technik) und Titan (Implantate, Gerüstmaterial für Kronen und Brücken) verwendet [19].

Durch Zusammenschmelzen verschiedener Metalle lassen sich jedoch die Eigenschaften verbessern. Der entstandene Werkstoff wird als Legierung bezeichnet [20].

Die Vielfalt der verfügbaren Dentallegierungen erklärt sich aus den speziellen Anforderungen, die an Materialien für Zahnersatz und -füllungen, entsprechend dem jeweiligen Anwendungszweck, gestellt werden müssen [21].

Prinzipiell können Dentallegierungen aufgrund ihrer Hauptbestandteile in zwei Hauptgruppen, die Edelmetall- (EM-) sowie die Nichtedelmetall- (NEM-) Legierungen eingeteilt werden. Sind letztere frei von Edelmetallen, spricht man von edelmetallfreien (EMF-) Legierungen [19].

Während man bei Edelmetalllegierungen ferner zwischen Goldlegierungen, Palladiumlegierungen und Silberlegierungen unterscheiden kann, lassen sich Nichtedelmetalllegierungen weiter unterteilen in Kobalt-, Nickel-, und Titanlegierungen. Eine Übersicht über die angebotenen Legierungen mit ihren verschiedenen Legierungsgruppen liefert auch das „Das Dental Vademekum“ [1], [22].

Da die Korrosionsresistenz umso höher ist, je höher der Anteil an Edelmetallen ist [14], haben Edelmetalllegierungen eine gute Mundbeständigkeit [23].

Allerdings weisen auch die edelmetallfreien Legierungen, obwohl sie ausschließlich aus Nichtedelmetallen bestehen, bei geeigneter Zusammensetzung eine hohe Korrosionsresistenz auf. Erklären lässt sich die Korrosionsfestigkeit mit der ausgeprägten Neigung von Chrom und Kobalt zur Reaktion mit Sauerstoff. Ähnlich wie beim Titan bildet sich eine stabile Oxidschicht, welche die

metallische Oberfläche als Schutzschicht gegen den Angriff durch wässrige Lösung abschirmt [24].

Hinsichtlich der Verwendung von NEM-Legierungen kann gesagt werden, dass diese in der Zahnmedizin eine lange Tradition haben.

So stellte man bereits um 1860 Basisplatten aus Aluminium her. Im Jahre 1919 folgte die Einführung des Edelstahl (Chrom-Nickel-Stahl) zur Herstellung von Basisplatten, Klammern und Bügeln. Da allerdings Schwierigkeiten bei Wärmebehandlung, z.B. beim Löten auftraten, werden Edelstähle in der Zahntechnik kaum noch verarbeitet und wurden von vergießbaren Legierungen auf der Chrom- oder Nickelbasis abgelöst [25].

So wurde 1932 von *Erdle* und *Prange* (*Erdle* 1937) die vergießbare Kobalt-Chrom-Legierung *Vitallium* eingeführt, welche auch heute noch den Grundbaustein der Kobalt-Chrom-Legierung darstellt [26].

Als kostendämpfende Alternative zu den Edelmetalllegierungen haben sich heute edelmetallfreie Legierungen, insbesondere auf Kobalt-Chrom- und Nickel-Chrom-Basis, neuerdings auch Titan etabliert [27].

Da sich ferner die Fragestellung der Dissertation mit Kobaltbasislegierungen beschäftigt, werden diese nachfolgend näher charakterisiert.

Kobaltbasislegierungen

Kobaltbasislegierungen werden zumeist als Werkstoff für Modellgussarbeiten verwendet [28], [29], [30].

Neben den ökonomischen Aspekten bieten sie aus werkstoffkundlicher Sicht gegenüber den Edelmetalllegierungen den Vorteil, dass sie einen höheren Elastizitätsmodul und eine höhere Warmfestigkeit besitzen. Somit eignen sie sich auch gut für weitspannige Brücken und für Arbeiten mit Verblendung [27]. Insbesondere der gegenüber Edelmetalllegierungen doppelt so hohe Elastizitätsmodul, bei sonst vergleichbaren mechanischen Eigenschaften, bietet sowohl aus medizinischer, als auch aus technologischer Sicht Vorteile. Denn so ist eine grazilere Gestaltung z.B. bei Interdentalräumen, Gerüststärke und dünn auslaufender Cervicalrändern möglich. Dadurch wird nicht nur das ästhetische

Ergebnis verbessert, sondern auch ein schonenderes Präparieren mit geringerem Zahnhartsubstanzverlust gewährleistet [31].

Doch Kobaltbasislegierungen bieten nicht nur im Vergleich zu Edelmetalllegierungen Vorteile. So zeichnen sie sich ferner gegenüber Nickelbasislegierungen durch ein besseres Korrosionsverhalten aus [32], [33]. Selbst im aggressiven Korrosionsmedium (10 %ige Eisenchloridlösung (FeCl_3)) ist ihr Korrosionsverhalten vergleichbar mit dem von hochgoldhaltigen Legierungen [34].

Als Hauptbestandteil enthalten Kobaltbasislegierungen 50-70 Gewichtsprozent Kobalt (Co), daneben mindestens 25 Gewichtsprozent Chrom (Cr) und mindestens vier Gewichtsprozent Molybdän (Mo) [35], [31].

Dabei prägt Kobalt, als Basis der Kobalt-Chrom-Legierungen, ihre mechanischen Eigenschaften, die Düninflüssigkeit und trägt ferner durch Oxidbildung zur Passivierung bei. Chrom hingegen ist der Bestandteil, der am meisten zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit beiträgt [36], [37], [38].

Neben Chrom trägt auch Molybdän zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit bei und wirkt zudem stabilisierend auf das Gefüge [26].

Damit die Legierung eine ausreichende Korrosionsfestigkeit besitzt, muss die Summe aus Kobalt, Chrom und Molybdän mindestens 85 Gewichtsprozent betragen, wobei Korrosionsuntersuchungen und die Erfahrung zeigen, dass ein Chromgehalt von mindestens 25 % und ein Molybdängehalt von mindestens 4 % einen ausreichende Korrosionsschutz bietet [35], [39].

Dies entspricht auch den Mindestanforderungen nach DIN EN ISO 22674 [40].

Als Faustregel gilt auch, dass folgende Formel erfüllt sein muss:

$$\text{Cr} + 3.3 \times (\text{Mo} + 0.5 \text{ W}) > 30$$

Auf die Wirkung von Molybdän betreffend bedeutet dies, dass die Korrosionsstabilität durch eine doppelte Menge an Wolfram (W) [35], welches eine ähnliche korrosionsvermindernde Wirkung wie Molybdän hat [36], erreicht werden kann. Ferner hat Molybdän einen um den Faktor 3.3 höheren Effekt bezüglich der Korrosionsstabilität als Chrom. Allerdings muss die gesamte Summe an

Chrom und 3.3 x Molybdän bzw. 1,65 x Wolfram mindestens 30 Gewichtsprozent ergeben [35].

Gute Legierungen können dadurch in ihrer Korrosionsfestigkeit vergleichbar mit Edelmetalllegierungen werden [41].

Als Nebenbestandteile werden Elemente wie z.B. Silizium (Si) und Niob (Nb) hinzulegiert, um die mechanischen Eigenschaften zu verbessern [28], [38], oder um wie Cer und Mangan (Mn) als Desoxidationsmittel einer erhöhten Chromoxidation entgegenzuwirken [28].

Obwohl Kobaltbasislegierungen eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit haben [29], [42], [43], [44], [45], [46], sind sie sowohl für den Zahntechniker, als auch für den Zahnarzt, aufgrund ihrer Härte schwer zu bearbeiten [29].

Um daher die verarbeitungstechnischen Eigenschaften zu modifizieren, sind neuerdings edelmetallhaltige Kobaltbasislegierungen auf dem Markt, denen prozentual geringe Anteile an Edelmetallen (Gold, Platin, Ruthenium) und Nichtedelmetallen (Indium, Gallium, Mangan, Wolfram) zulegiert wurden, welche eine Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften bewirken sollen [29].

Allerdings sind diese neuartigen Kobaltbasislegierungen auch mit Nachteilen behaftet. Denn so kann es z.B. zur Ausbildung von elektrochemisch äußerst ungünstigen heterogenen Gefügen kommen [5].

2.2 Korrosion

2.2.1 Definition von Korrosion

Gemäß DIN EN ISO 10271:2001 wird Korrosion definiert als „physikalisch-chemische Wechselwirkung zwischen einem Metall oder einer Legierung und der Umgebung, die zu einer teilweisen oder vollständigen Zerstörung des Materials oder zu einer Änderung seiner Eigenschaften führt“ [47].

2.2.2 Mechanismen der Korrosion

Ursächlich für die Korrosion verantwortlich ist das Bestreben der Metalle (mit Ausnahme der Edelmetalle) wieder aus dem metallischen in den für sie stabilen Zustand chemischer Verbindungen (meist als Oxide und Sulfide) zurückzukehren [48].

Prinzipiell lassen sich zwei Arten der Korrosion unterscheiden, die chemische Korrosion und die elektrochemische Korrosion [49].

Die chemische Korrosion ist dadurch gekennzeichnet, dass der Werkstoff mit seiner Umgebung (meist Luftsauerstoff) reagiert, ohne dass dabei ein Elektrolyt (ionenleitende Flüssigkeit) vorhanden ist [50].

Im zahntechnischen Alltag treten Oberflächenveränderungen durch chemische Korrosion nahezu täglich auf [51].

So tritt die chemische Korrosion beispielsweise bei unsachgemäßer Verarbeitung von Edelmetalllegierungen in Erscheinung. Werden nämlich Edelmetalllegierungen mit Nichtedelmetallzusätzen zu lange oder zu hoch erhitzt, entstehen in den tieferliegenden Regionen der Legierung Oxide der Nichtedelmetalle. Diese lagern sich beim Auskristallisieren zwischen den Korngrenzen ab und setzen damit die Duktilität der Legierung herab, was Risse beim Biegen provozieren kann. Ein Beispiel für eine chemische Korrosion wäre die Schwefelschädigung bei Silber-Palladium-Legierungen. Diese kommt durch das Verkohlen unvollständig aus der Muffel ausgetriebenen Wachses in gipsgebundenen Einbettmassen zustande. In Verbindung mit dem Metall entstehen PdS und Ag₂S [52], [53].

Eine bedeutendere Rolle, als die chemische Korrosion, spielen im zahnmedizinischen Bereich jedoch Korrosionsprozesse, die in der Mundhöhle, vom Speichel als Elektrolytlösung vermittelt, ablaufen. Bei dieser Art der Korrosion handelt es sich um eine elektrochemische Korrosion. Durch sie wird ein Metall von der Oberfläche beginnend durch elektrochemische Reaktionen zerstört [54].

Elektrochemische Reaktionen stellen Redoxreaktionen dar, die beispielsweise ablaufen, wenn man ein Metallstab in eine Elektrolytlösung taucht. Wie der Na-

me Redoxreaktion bereits indiziert, laufen dabei mindestens zwei elektrochemische Einzelreaktionen (Oxidation und Reduktion) ab, die gekoppelt sind:

1. anodischer Prozess, Elektronenabgabe (Oxidation)



2. kathodischer Prozess, Elektronenaufnahme (Reduktion)



Dabei werden bei der kathodischen Reaktion, die in der anodischen Reaktion erzeugten Elektronen verbraucht, wobei abhängig vom vorherrschenden pH-Wert entweder die Säurekorrosion oder die Sauerstoffkorrosion abläuft. Denn so tritt bei $\text{pH} < 5$ Reaktion III auf, während die Reaktionen IV und V bei $\text{pH} > 5$ (Reaktion V bei den pH-Werten 5-7; Reaktion IV bei pH 7-12) auftreten [55], [56].

Am Metallstab selbst tritt an der Phasengrenze Metall / Elektrolyt eine Wechselwirkung zwischen Metall und Elektrolyt auf. Dabei hat das Metall das Bestreben positive Ionen in Lösung zu schicken. Durch die zurückgebliebenen Elektronen lädt sich der Metallstab negativ auf und zwischen Elektrolyt und Metallstab bildet sich ein elektrisches Potential, welches es weiteren positiv geladenen Ionen aus der metallischen Oberfläche verhindert, in die Lösung abzuwandern. Es bildet sich ein dynamisches Gleichgewicht aus, d.h. die Zahl der in Lösung gehenden und der sich wieder abscheidenden Ionen ist gleich groß [57].

Die dabei messbare Spannung gegenüber einer Referenzelektrode wird Ruhe- oder auch Korrosionspotential (E_{corr}) genannt [58].

Allerdings findet beim Ruhepotential noch keine Korrosion statt. So findet die eigentliche Korrosion erst statt, wenn das gebildete dynamische Gleichgewicht gestört wird. Eine Störung des Gleichgewichts kann beispielsweise durch Entzug von Elektronen, durch Bildung von chemischen Verbindungen mit den

Metall-Ionen oder durch die Ausbildung eines galvanischen Elements erfolgen [59].

Genau wie die oben beschriebene Anordnung „Metallstab in Elektrolytlösung“ ein galvanisches Halbelement darstellt, bildet auch jedes Metall im Mund ein galvanisches Halbelement.

Zur Ausbildung eines galvanischen Elements kommt es, wenn zwei unterschiedliche Metalle verbunden sind und in eine Elektrolytlösung tauchen [60].

Der Speichel ist, aufgrund seines Ionengehalts, ein Elektrolyt. In der Mundhöhle kommen häufig verschiedene Metalle mit unterschiedlicher Lösungstendenz zum Einsatz [61].

Als Gründe können beispielsweise angeführt werden [62]:

- unterschiedliche Indikationen bedingen verschiedene Legierungen (z.B: Inlay- und Modelguss-Legierungen, Kombitechnik)
- es wird gelötet (Lote) oder lasergeschweißt (Zulegierungswerkstoffe)
- in der Implantologie kommt es zur Verwendung verschiedener Legierungen für die Implantate und Suprakonstruktionen

Stehen diese in metallischem Kontakt, wie dies beispielsweise auch beim approximalen Kontakt einer Amalgamfüllung mit einer gegossenen Füllung aus Edelmetall der Fall ist, so bildet sich durch die Gegenwart des Speichels ein galvanisches Element und die Möglichkeit der elektrochemischen Korrosion ist gegeben [61].

Denn zur Ausbildung eines elektrochemischen Korrosionselements ist die Existenz von zwei miteinander leitend verbunden Elektroden, deren Potentiale voneinander abweichen, und eines leitfähigen Elektrolyten nötig [56].

Ergänzend kann gesagt werden, dass Potentialdifferenzen nicht nur zwischen zwei verschiedenen Metallen entstehen können, sondern auch in ein- und demselben Metallstück auftreten können. Dies ist z.B. der Fall, wenn die chemische Zusammensetzung örtlich verschieden ist, wie etwa bei Einschlüssen, Ausscheidungen oder Seigerungen [63].

2.2.3 Korrosionsarten

In der Mundhöhle kann man verschiedene Korrosionsarten unterscheiden, wobei diese grob in Flächenkorrosion und lokale Korrosion eingeteilt werden können [64].

Die Flächenkorrosion stellt eine Korrosionsart dar, bei der sich ein gleichmäßiger Flächenabtrag einstellt. Dies bedeutet, dass sich die gesamte Metalloberfläche ungefähr mit derselben Geschwindigkeit auflöst. Bei der Flächenkorrosion sind plötzlich auftretende Schäden nicht zu befürchten [65].

Auch kann der gleichmäßige Metallabtrag dazu führen, dass ein metallischer Werkstoff nach längerer Tragezeit einen guten Oberflächenglanz aufweist, obwohl sich mittlerweile das Metall an der Oberfläche aufgelöst hat [2].

Lokale Korrosion hingegen führt i.d.R. zu einem ungleichmäßigen Korrosionsangriff, weil das Korrosionselement eine galvanische Zelle darstellt, die aus Anode, Kathode und dem Elektrolyten besteht [65].

Bei der lokalen Korrosion unterscheidet man zwischen [66]:

- Spaltkorrosion
- Kontaktkorrosion
- Lochfraßkorrosion
- Interkristalline Korrosion

Nachfolgend werden diese kurz erläutert. Ferner sind in Abbildung 1 die wichtigsten Korrosionserscheinungen schematisch dargestellt.

Spaltkorrosion

Unter Spaltkorrosion versteht man einen in engen Spalten oder Oberflächendefekten verstärkten auftretenden Korrosionsangriff.

Ursache für das Auftreten von Spaltkorrosion sind unterschiedliche Metallionen- oder Sauerstoffkonzentrationen (Konzentrations-Belüftungselement). Denn durch den engen Spalt findet kein ständiger Austausch von Elektrolytflüssigkeit statt, so dass stagnierende Verhältnisse herrschen und die Sauerstoffkonzentration im Spalt niedriger ist als außen. Dadurch agiert der Bereich geringeren

Sauerstoffgehaltes als Anode, während die kathodische Reaktion an den sauerstoffreichen Bereichen abläuft. Entsprechend kommt es zur Schädigung des anodischen Bereiches [67], [68]. In der Mundhöhle finden sich relativ viele Prädilektionsstellen für Spaltkorrosion, wie z.B. zwischen Matrize und Patrize von Geschiebe- bzw. Teleskopkonstruktionen, zwischen Verblendmaterial (v.a. Kunststoff) und darunterliegendem Metall, unter Plaquebelägen, im Interdentalraum (v.a. am Kontaktpunktbereich) etc. Allgemein lässt sich dabei festhalten, dass je größer die Sauerstoffdifferenz zwischen Spalt und Umgebung ist (schmäler und langer Spalt), desto aggressiver wird die Spaltkorrosion [69].

Kontaktkorrosion

Kontaktkorrosion kommt zustande, wenn sich verschiedene metallische Werkstoffe unmittelbar berühren. Dadurch wirkt das unedlere Metall bevorzugt als Anode und das edlere Metall als Kathode [66]. Auch im Mund kann es beispielsweise bei Berührung einer Amalgamfüllung mit einer Goldkrone zu einer Kontaktkorrosion kommen. Ferner können Kontaktkorrosionen auch bei aus unterschiedlichen Werkstoffen zusammengesetzten Strukturen wie Implantataufbauten, Konstruktionselementen etc. zu Kontaktkorrosion auftreten [70].

Lochfraßkorrosion

Kennzeichnend für Lochfraßkorrosion sind an der Oberfläche auftretende kraterförmige oder nadelstichartige Vertiefungen, die sich in die Tiefe ausweiten können und somit zu einer Durchlöcherung des Werkstoffes führen können [66]. Lochfraßkorrosion tritt v.a. in halogenid-, speziell chloridhaltigen Lösungen, besonders oberhalb kritischer Temperaturen auf [71], [72]. Durch Molybdänzusatz kann sowohl das Lochfraßpotential, als auch die kritische Temperatur, angehoben werden. Somit zeichnen sich molybdänhaltige Sorten durch eine bessere Lochfraßbeständigkeit aus [71].

Interkristalline Korrosion

Gemäß DIN EN ISO 8044:1999 handelt es sich bei der interkristallinen Korrosion um die Korrosion in oder neben den Korngrenzen eines Metalls. Ursäch-

lich für das Auftreten von interkristallinen Korrosionen sind die Konzentrationsunterschiede zwischen Kern und Rand der Kristalle. Dabei kann diese Form der Korrosion den Zusammenhalt der Kristallite so schwächen, dass es zum Kornzerfall kommt [73].

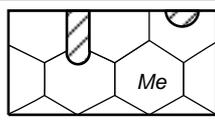
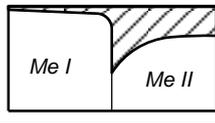
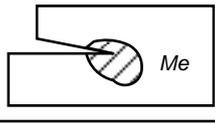
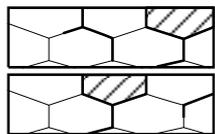
Angriffsform		Schema
Gleichmäßiger Flächenabtrag	Gleichmäßige Flächenkorrosion Δs Dickenabnahme	
Ungleichmäßiger (örtlicher) Abtrag	Lochfraß, Muldenfraß Örtliche Vertiefung bei praktisch nicht angegriffener Umgebung	
	Kontaktkorrosion Bevorzugter Angriff des unedleren Me II (als Anode des Korrosionselements)	
	Spaltkorrosion Bevorzugter Angriff des Spaltgrundes (als Anode eines Belüftungselementes)	
	Interkristalline Korrosion Selektiver Angriff im Korngrenzenbereich a) ohne, b) mit statischer Zugbelastung	

Abbildung 1: Korrosionsarten in Anlehnung an Worch et al. [64]

2.2.4 Passivität

Nach ASTM (American Society for Testing and Materials) versteht man unter Passivität dass ein Metall, bedingt durch den Zustand seiner Oberfläche, in einem Potentialbereich, der stark oxidierend für das Metall ist, eine niedrige Korrosionsrate aufweist [74].

Passivität tritt bei vielen unedlen, d.h. normalerweise leicht reagierenden Metallen, wie Eisen, Nickel, Kobalt und ganz besonders Chrom in Erscheinung [75]. Sie wird dadurch hervorgerufen, dass sich auf der Oberfläche der Metalle eine für potentielle Reaktionspartner undurchlässige, fest haftende ca. 3 nm dicke Schicht aus Oxiden oder Hydroxiden des jeweiligen Metalls ausbildet [76]. Metalle, die eine solche schützende Passivschicht aufweisen, verhalten sich ähnlich wie Edelmetalle, d.h. sie sind gegenüber Säuren, von denen sie im norma-

len Zustand angegriffen werden beständig und weisen so ein bessere Korrosionsresistenz auf. Allerdings ist anzumerken, dass sowohl für die Bildung, als auch für das Fortbestehen der schützenden Passivschicht, Luft bzw. Sauerstoff nötig ist. Wird daher die Passivschicht durch mechanische oder chemische Einwirkung zerstört oder tritt Sauerstoffmangel auf, verschieben sich die Korrosionspotentiale zu unedleren Werten und der Korrosionsschutz geht verloren [75].

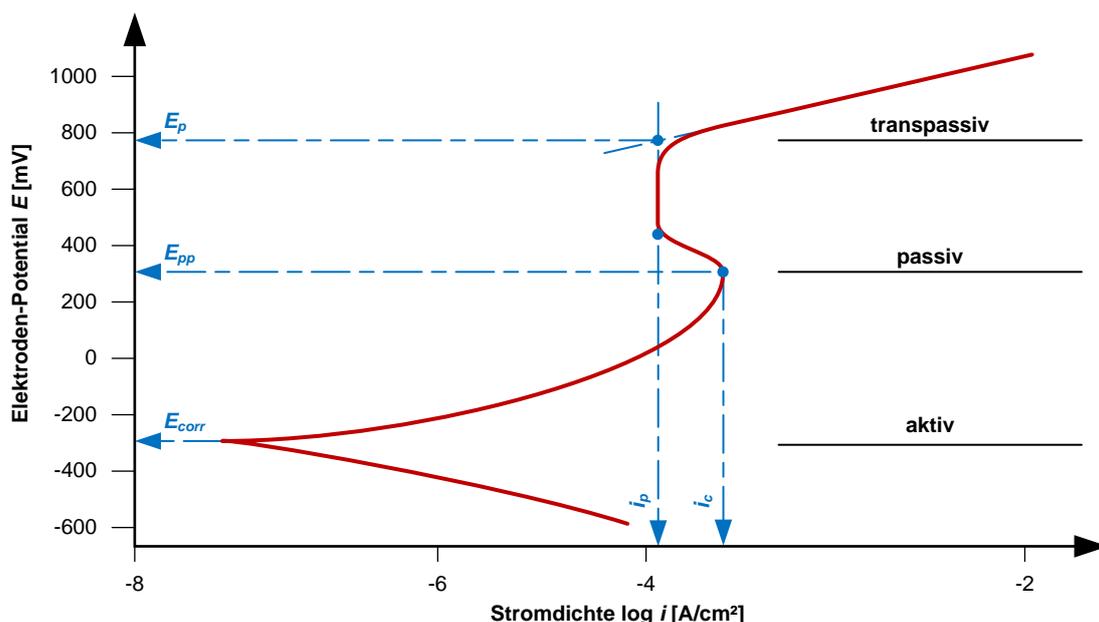


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Stromdichte-Potential-Kurve

Die Abbildung 2 zeigt eine typische Stromdichte-Potential-Kurve eines passivierbaren Metalls mit den drei Abschnitten: aktiver, passiver und transpassiver Bereich. Es zeigt sich, dass beim Überschreiten des Ruhe- oder Korrosionspotentials (E_{corr}) mit zunehmender positiver Polarisierung der Korrosionsprozess beginnt. Folglich befindet sich die Legierung nun im aktiven, d.h. anodisch korrosiven Zustand. Dabei nimmt die Stromdichte exponentiell mit dem angelegten Potential zu. Ab einem bestimmten, für das Metall charakteristischen Passivierungspotential (E_{pp}), bleibt die Stromdichte nahezu konstant oder fällt rapide ab. Dabei gelangt das Metall in den Passivzustand. Der Passivzustand ist dadurch gekennzeichnet, dass die Stromdichte, trotz Potentialerhöhung, konstant bleibt. Bei weiterer Erhöhung des Potentials wird nach Überschreitung des Durchbruchpotentials (E_p) der transpassive Bereich erreicht.

2.2.5 Einflussfaktoren auf Korrosion

Korrosionsprozesse können von verschiedenen internen und externen Faktoren beeinflusst werden. Denn so wird die Art und Geschwindigkeit von Korrosionsvorgängen sowohl von Werkstoffeigenschaften, als auch von Umgebungs- und Medienbedingungen beeinflusst.

Zu den wesentlichen Einflussfaktoren auf den Korrosionsablauf zählen bei den Werkstoffeigenschaften zunächst die Art des Werkstoffs [81].

Hinzu kommen auch konstruktive Gesichtspunkte, wie die Kombination unterschiedlicher Metalle (Kontaktkorrosion) wie z.B. bei Lötungen oder das Vorhandensein von Zwischenräumen (Spaltkorrosion) [1].

Ferner nehmen noch eine Reihe weiterer Faktoren, wie z.B. Oberflächenbeschaffenheit, Wärmebehandlung des Werkstoffes, Verformungsgrad, Belastungszustand und etwaige Verunreinigungen im Werkstoff, Einfluss auf das Korrosionsgeschehen [81]. Denn so wird Lochfraß durch eine raue, inhomogene, z.B. mit Karbideinschlüssen durchsetzte Oberfläche begünstigt [72]. Weiterhin erhöht z.B. das Wiedervergießen, und / oder Überhitzen einer Legierung die Ionenabgabe. Aber auch keramische Brände können das Korrosionsgeschehen ungünstig beeinflussen [59], [82], [83], [84], [85].

Darüber hinaus beeinflusst auch die Natur der schützenden Oxidschicht (Passivschicht) das Ausmaß der Korrosionsrate [1], [86].

Neben den Werkstoffeigenschaften nehmen auch Umgebungs- und Medienbedingungen Einfluss auf das Korrosionsgeschehen. Zu nennen wären hier zunächst die chemische Zusammensetzung des Mediums (pH-Wert, Sauerstoffgehalt, Inhaltsstoffe). Der pH-Wert des menschlichen Mundspeichels liegt zwischen 5,25 und 7,86. Erniedrigt sich der pH-Wert, sei es durch eine erniedrigte Sekretionsrate, den Genuss saurer Speisen und Getränken oder durch die Einnahme von Medikamenten, desto besser ist die elektrische Leitfähigkeit und desto eher kann mit elektrochemischen Vorgängen gerechnet werden [87], [59], [88].

Bezüglich der Inhaltsstoffe kann gesagt werden, dass Chlorid-Ionen, welche mit einer mittleren Konzentrationen von 600-700 mg/l im Speichel vorhanden sind, zu den aggressivsten Anionen zählen [89], [90].

Darüber hinaus ist auch bekannt, dass z.B. Lochkorrosion in Anwesenheit von Fluoriden [91], Perchloraten, Sulfaten und Nitraten auftreten kann. Allerdings hängt die Wirkung der einzelnen Anionen vom verwendeten Legierungstyp ab. Es kann aber angenommen werden, dass kleine Ionen und solche mit hoher Ionenladung die Passivschicht leichter zerstören und somit Korrosionsprozesse auslösen [92].

Ferner spielen, in Hinblick auf den Korrosionsablauf, auch Temperatur, Druck und Strömungsbedingungen eine Rolle [81]. So beschleunigen Temperaturerhöhungen den Korrosionsvorgang [93].

Neben diesen grundlegenden Einflussgrößen können auch auftretende Belastungen zur Beeinflussung des Korrosionsgeschehens führen. So kann z.B. ein mechanischer Zusammenbruch der Passivschicht durch die reibende Kaubelastung entstehen. Folglich wird die schützende Oxidschicht der Legierungsoberfläche zerstört und dadurch die Korrosionsrate erhöht [1], [11].

Ferner hat auch die Mundhygiene der Patienten einen gewissen Einfluss auf die Korrosion. Denn so kann unter Plaquebelägen, infolge der bakteriellen Stoffwechselprodukte, der pH-Wert bis auf 4,5 absinken [94] und es können somit Bedingungen entstehen, die aggressive Korrosionsvorgänge fördern (mikrobielle Korrosion) [1], [95], [96].

2.2.6 Methoden zur Bestimmung der Korrosionsstabilität

Zur Analysierung des Korrosionsverhaltens von Legierungen und deren Kombinationen (z.B. Lötungen) stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Allgemein lassen sich solche Untersuchungen in In-vitro- und In-vivo-Tests unterteilen [2], [9].

Bei In-vitro-Versuchen finden die Untersuchungen, im Gegensatz zu In-vivo-Versuchen, außerhalb des lebenden Organismus unter kontrollierten Bedingungen statt und bieten daher in vielerlei Hinsicht Vorteile.

Sicherlich mit einer der wichtigsten Vorteile von In-vitro-Versuchen ist, dass Schädigungen von Geweben oder ganzen Organismen ausgeschlossen werden können.

Darüber hinaus ist bei In-vitro-Versuchen der apparative Aufwand geringer, was eine leichtere Reproduzierbarkeit, verbunden mit einem geringeren Kostenaufwand, ermöglicht [97].

Weiterhin von Vorteil ist, dass die Versuche unter standardisierten Bedingungen durchgeführt werden können. Somit können zum einen die beeinflussenden Faktoren besser kontrolliert werden und zum anderen ist durch die standardisierten Versuchsbedingungen ein besseres Vergleichen der Ergebnisse untereinander möglich [97].

Zudem ist der zeitliche Aufwand geringer. Dadurch können Vorgänge, die in Wirklichkeit erst nach einer langen Zeit wirksam geworden wären, beschleunigt werden, um so zu einem früheren Zeitpunkt Ergebnisse über die Eignung der zu untersuchten Legierung zu bekommen [97].

Weiterhin ist zu bedenken, dass bei In-vivo-Tests in der Mundhöhle von Probanden oft nur geringe Spuren von Metallen frei werden, so dass diese kaum messbar sind und somit weder Menge noch chemische Form der Korrosionsprodukte genau bestimmt werden kann. Von Vorteil sind daher In-vitro-Versuche, da bei ihnen aggressivere Versuchsbedingungen gewählt werden können und dadurch größere Mengen frei werden, was das Messen erleichtert [97]. Trotz der vielen Vorteile haben In-vitro-Untersuchungen allerdings den Nachteil, dass jeder In-vitro-Versuch, unabhängig davon wie realitätsnah er durchgeführt wird, lediglich eine Modellannäherung an die klinische Situation darstellt. Somit kann nicht mit absoluter Sicherheit gewährleistet werden, dass die im Labor unter In-vitro-Bedingungen gewonnenen Ergebnisse auf den klinischen Einsatz übertragen werden können. Um jedoch möglichst praxisnahe Ergebnisse zu erzielen, sollte versucht werden die Mundhöhlenverhältnisse möglichst realistisch darzustellen [14].

Abschließend kann jedoch gesagt werden, dass trotz dieses Nachteils In-vitro-Untersuchungen in vielerlei Hinsicht Vorteile bieten, was erklärt, weshalb heutzutage vornehmlich In-vitro-Korrosionsversuche durchgeführt werden.

Bei den In-vitro-Korrosionsuntersuchungen sieht die DIN EN ISO 10271:2011 gegenwärtig drei Untersuchungsmethoden vor, anhand derer das Korrosionsverhalten von dentalen metallischen Werkstoffen analysiert werden kann. Dies wären der Immersionstest, der elektrochemische Test sowie Anlauftests für verfärbungsanfällige Legierungen [14], [47].

Da im Rahmen dieser Dissertation das Korrosionsverhalten mittels des Immersionstests und des elektrochemischen Tests untersucht wurden, werden diese nachfolgend kurz erläutert.

Immersionstest

Beim Immersionstest nach Vorgaben der Norm DIN EN ISO 10271:2011 werden Prüfkörper für 42 Tage in einer 0,1 M Kochsalz-Milchsäure-Lösung bei pH 2,3 eingelagert. Dabei soll das Verhältnis der Oberfläche in mm^2 zu dem Volumen der verwendeten Elektrolytlösung in ml 1 cm^2 pro ml betragen [98], [47].

Nach Versuchsablauf wird der Gewichtsverlust bestimmt, indem die Proben vor und nach der Lagerung ausgewogen werden. Zur Sicherung der Ergebnisse ist eine Analyse der Korrosionslösung im Hinblick auf die in Lösung gegangenen Ionen und deren Menge nötig. Die Bestimmung der korrodierten Bestandteile kann dabei photometrisch mittels Atom-Absorptions-Spektroskopie (ASS) oder vergleichbarer Messmethoden erfolgen [98], [99].

Auf diese Weise bekommt man nicht nur eine Information über die Korrosionsanfälligkeit der Legierung, wie bei den elektrochemischen Untersuchungsmethoden, sondern auch darüber, welche Legierungselemente in Lösung gegangen sind [98].

Elektrochemischer Test

Bei den elektrochemischen Tests kann man zwischen potentiodynamischen und potentiostatischen Messmethoden unterscheiden. Im Gegensatz zur potentiostatischen Polarisation wird bei der heutzutage häufiger eingesetzten potentiodynamischen Polarisation [93], [100], [101], [2] nicht eine konstante

Spannung vom Potentiostaten vorgegeben, sondern das vorgegebene Potential ausgehend von einem Anfangswert kontinuierlich erhöht [100].

Zunächst erfolgt die Bestimmung des Ruhe- oder Korrosionspotenzials (E_{corr}). Gemäß den Normen DIN 50918 und DIN EN ISO 10271:2011 [47] wird dazu die Spannung zwischen der Probe (Arbeitselektrode) und der Bezugselektrode mittels eines hochohmigen Voltmeters im offenen Stromkreis gemessen. Dabei kann die Einstellung des Korrosionspotentials legierungsspezifisch mehrere Stunden dauern [102], [14].

Anhand der Ruhepotentiale können erste Informationen bezüglich des Korrosionsverhaltens der Legierungen gewonnen werden, da eine Legierung umso korrosionsresistenter ist, je positiver das Ruhepotential ist [14].

Anschließend wird an die zu untersuchende Legierung ein elektrisches Potential angelegt. Dieses wird langsam erhöht und an der Legierungsoberfläche wird der umgesetzte Strom gemessen, der ein Maß für die Korrosionsgeschwindigkeit ist. Wichtig dabei ist, dass die Polarisationsgeschwindigkeit langsam genug gewählt wird, damit auch langsame Elektrodenreaktionen registriert werden. Allerdings sollte, um eine praktikable Versuchsdauer zu ermöglichen, die Polarisationsgeschwindigkeit auch nicht zu langsam gewählt werden. In der Literatur werden daher für die Polarisationsgeschwindigkeit Werte zwischen 0,01-10 mV/s empfohlen [100], [6].

Anhand der gewonnenen Werte können Stromdichte-Potential-Kurven erstellt werden, indem man den Strom I [A] bzw. die auf die Probeoberfläche bezogene Stromdichte i [A/cm²] über dem Potential E [V] aufträgt. Aus diesen können dann wichtige Informationen gewonnen werden, aus denen Rückschlüsse auf das Korrosionsverhalten gezogen werden können. So können beispielsweise Aussagen über die Fähigkeit der spontanen Passivierung einer Legierung gemacht werden. Darüber hinaus liefern sie Informationen über den Potentialbereich der Passivität und der Korrosionsrate im Passivzustand sowie über den Zusammenbruch der Passivität anhand des Durchbruchpotentials [93].

Allerdings haben sowohl der Immersionstest, als auch der elektrochemische Test Vor- und Nachteile.

Sowohl der Immersionstest, als auch der elektrochemische Test haben den Vorteil, dass sie einfacher realisierbar sind als in In-vivo-Tests.

Nachteilig am Immersionstest ist, dass für die Durchführung viele Tage oder gar Wochen benötigt werden, während ein elektrochemisches Experiment nur wenige Stunden dauert [98], [93].

Weiterhin ist von Nachteil, dass die Korrosionsprodukte teilweise fest an der Oberfläche der Prüfkörper haften bleiben und somit erst von der Oberfläche abgelöst werden müssen, damit der tatsächlich eingetretene Gewichtsverlust korrekt bestimmt werden kann [103].

Weiterhin ist beim Immersionstest zu bemängeln, dass man keine Informationen über den zeitlichen Verlauf der Korrosion erhält und somit unklar ist, ob die ermittelten korrosiv herausgelösten Metallmengen nur kurzfristig als Anfangskorrosion oder dauerhaft als Langzeiteffekt aufgetreten sind. Diesem Problem kann man jedoch entgegenzutreten, indem man einen längeren Versuchszeitraum (bis zu mehreren Wochen) mit unterschiedlich langen Einlagerungsperioden wählt [98].

Dieses Vorgehen wurde auch im Rahmen dieser Dissertation, gewählt.

2.3 Studien zu ähnlichen Fragestellungen

Bei Kobaltbasislegierungen liegt der Kobaltanteil (Gewichtsprozent) zwischen 50-70 % der Chromanteil zwischen 20-30 % [35], [31].

In der Literatur finden sich mehrere Versuche die sich mit der Fragestellung beschäftigen, wie das Zulegieren von unterschiedlichen Metallzusätzen eine Modifikation der Kobaltbasislegierungen bewirkt.

Basierend auf der Tatsache, dass Edelmetalllegierungen ein besseres Korrosionsverhalten zeigen, als nicht Edelmetalllegierungen, wurde versucht, durch Zulegieren von Edelmetallen Gold, Platin, Ruthenium, das Korrosionsverhalten von Kobaltbasislegierungen zu verbessern. Allerdings konnte in Versuchen von

Reclaru et al. gezeigt werden, dass ein Zusatz dieser Edelmetalle nicht das Korrosionsverhalten von konventionellen Kobalt-Chrom-Legierungen verbessert [29].

Neben *Reclaru et al.* beschäftigten sich auch *Nascimento et al.*[104] mit der Fragestellung, wie das Zulegieren von Edelmetallen sich auf das Korrosionsverhalten von Kobaltbasislegierungen auswirkt. Zum Einsatz kamen bei den Versuchen von *Nascimento et al.* die vier Legierungen Wironit, Bärlight, Gold Core und Porta Smart. Während es sich bei der Legierung Wironit um eine konventionelle Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierung handelte, enthielt die Legierung Porta Smart kein Chrom und kein Molybdän, dafür aber Platin und Ruthenium. Bei den Legierungen Bärlight und Gold Core handelte es sich um Kobaltbasislegierungen denen ein kleiner Goldanteil zulegiert wurde. Wie bereits in den Versuchen von *Reclaru et al.* zeigte sich auch hier, dass das Zulegieren von Edelmetallen nicht das Korrosionsverhalten von Kobaltbasislegierungen verbessert. Denn so trat Lochkorrosion verstärkt bei den Legierungen auf, die Gold enthielten.

In einer weiteren Studie wurde untersucht, welche Verbesserungen sich durch das Zulegieren von Titan zu Kobaltbasislegierungen ergeben. Zum Einsatz kamen dabei zwölf Kobalt-Chrom-Legierungen mit unterschiedlichem Titangehalt (vier bis zwölf Gewichtsprozent). Alle untersuchten Legierungen zeichneten sich durch sehr hohe Durchbruchspotentiale und eine gute Korrosionsresistenz aus. Nachteilig jedoch ist, dass Titan (Ti), aufgrund der Härte, schwer zu verarbeiten ist, weshalb sich nur drei der zwölf untersuchten Legierungen ($\text{Co}_{66}\text{Cr}_{30}\text{Ti}_4$, $\text{Co}_{61}\text{Cr}_{35}\text{Ti}_4$ und $\text{Co}_{72}\text{Cr}_{20}\text{Ti}_8$) für die medizintechnische Anwendung eignen [105].

2.4 Aufgaben und Zielstellung

In Zeiten steigender Rohstoffpreise für Edelmetalllegierungen sowie restriktiver Maßnahmen der Krankenkassen gewinnen NEM-Legierungen zunehmend an Bedeutung, da sie eine kostengünstigere Alternativen darstellen.

Während sich dabei v.a. Kobalt-Chrom-Legierungen als Werkstoffe für Modelgussprothesen bewährt haben, spielen diese in den letzten Jahren auch in der Kronen- und Brückentechnik eine zunehmend bedeutendere Rolle. Jedoch birgt deren Einsatz auch Nachteile. Denn so sind Kobalt-Chrom-Legierungen, wie alle übrigen NEM-Legierungen, nicht so korrosionsstabil wie Edelmetalllegierungen. Da sich eine verminderte Korrosionsresistenz allerdings negativ auf Ästhetik, Funktion und Biokompatibilität von Zahnersatz auswirkt, sollte versucht werden mittels geeigneter Maßnahmen eine Verbesserung zu erzielen.

Wie bereits in Abschnitt 2.3 geschildert, wurden daher von verschiedenen Autoren Versuche unternommen durch das Zulegieren von Legierungselementen das Korrosionsgeschehen positiv zu beeinflussen.

Auch im Rahmen dieser Dissertation besteht die Aufgabenstellung darin, aufzuzeigen welchen Einfluss die Legierungszusammensetzung auf das Korrosionsverhalten hat. Zum Einsatz kommen dabei vier experimentelle Kobalt-Chrom-Legierungen (Co-1, Co-2, Co-3 und Co-4) von denen zwei einen unterschiedlichen Chromgehalt aufweisen. Desweiteren unterscheiden sich die Legierungen in ihrem Molybdän- und Wolframgehalt (vergleiche Tabelle 1, Abschnitt 3.1.1). Es stellten sich demnach folgende Fragen:

- Wie wirkt sich die Substitution von Molybdän und Wolfram (=gleicher PRE-Wert) auf das Korrosionsverhalten aus?
- Wie ist das Korrosionsverhalten einer Kobalt-Chrom-Legierung die kein Molybdän und Wolfram enthält zu beurteilen?
- Wie beeinflussen unterschiedliche Chromgehalte die Korrosionseigenschaften?

Um eine Antwort auf die oben genannten Fragen zu finden, sollen die vier Legierungen, in Anlehnung an DIN EN ISO 10271:2011 [47], sowohl im elek-

trochemischen Test, als auch im statischen Immersionstest auf ihr Korrosionsverhalten untersucht werden.

Da in der Mundhöhle der pH-Wert situationsbedingt Schwankungen unterliegt, kommen zur Simulation möglichst realistischer Bedingungen zwei Elektrolyte (0,9 % NaCl und 0,1 M NaCl-Milchsäure) mit unterschiedlichem pH-Wert zum Einsatz.

Ferner wird nach Ablauf des elektrochemischen Tests und des statischen Immersionstest eine analytische Auswertung gemacht um Hinweise über Art und Menge der in Lösung gegangenen Korrosionsprodukte zu bekommen.

Am Ende können dann aus den Ergebnissen der Untersuchungsmethoden (elektrochemischer Test, statischer Immersionstest und Analytik) Rückschlüsse gezogen werden, ob eine der vier experimentellen Legierungen eine geeignete Legierungszusammensetzung für den praktischen Einsatz aufweist.

3 Material und Methode

3.1 Material

3.1.1 Auswahl der Legierungen (verwendete Prüfkörper)

Die vier im Rahmen dieser Untersuchung eingesetzten experimentellen Kobalt-Chrom-Legierungen (Co-1, Co-2, Co-3 und Co-4) wurden von der Firma Dentallex (Hanau) bereitgestellt.

Laut den Angaben des Herstellers wurden die Legierungen im Labor „innovadent Zahntechnik e.k. Leverkusen“ im üblichen zahntechnischen Gussverfahren gegossen.

Dabei lagen je Legierung fünf Prüfkörper vor, die jeweils mit Hilfe des elektrochemischen Tests und des statischen Immersionstest auf ihr Korrosionsverhalten untersucht wurden. Die genaue Bezeichnung, sowie die Zusammensetzung der Legierungen in Gewichtsprozent, als auch die Wirksummen (PRE-Werte), sind der Tabelle 1 zu entnehmen. Dabei wurden die Wirksummen nach folgender Formel berechnet:

$$\text{PRE} = \text{Cr} + 3,3 (\text{Mo} + 0,5 \text{ W})$$

In allen nachfolgenden Abschnitten werden die Legierungen entsprechend den in Tabelle 1 verwendeten Bezeichnungen benannt.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Legierungen in Gewichtsprozent, sowie die jeweiligen berechneten PRE-Werte

Bezeichnung	Zusammensetzung							PRE
	Co	Cr	Mn	Si	W	Mo	Nb	
Co-1	71	28	0,5	0,5	-	-	-	28
Co-2	65	28	0,5	0,5	6	-	-	37,9
Co-3	71	20	0,5	0,5	-	7	1	43,1
Co-4	64	20	0,5	0,5	14	-	1	43,1

3.1.2 Auswahl des Elektrolyten

Um die verschiedenen Legierungen auf ihr Korrosionsverhalten zu untersuchen, bedarf es eines geeigneten Mediums, das als Elektrolyt fungiert und dabei möglichst den Verhältnissen der Mundhöhle nahe kommt.

Daher wäre es eigentlich am günstigsten, einfach menschlichen Speichel als Elektrolyten zu wählen. Allerdings unterliegt die Zusammensetzung des menschlichen Speichels erheblichen Schwankungen, weshalb andere Elektrolyte für Korrosionsuntersuchungen zum Einsatz kommen müssen.

So werden gegenwärtig bei Korrosionsprüfungen von dentalen Legierungen und Metallen eine Vielzahl an „künstlichen Speicheln“ (Tabelle 2) verwendet. Problematisch dabei ist, dass dadurch keine vergleichenden Untersuchungen möglich sind. Allerdings ist allen Elektrolyten gemeinsam, dass sie die Passivschicht schädigenden Chloridionen enthalten.

Ferner versucht man auch die Verhältnisse in der Mundhöhle im Biofermentor mit Staphylokokken oder Streptokokken Kolonien nachzubilden. Eine mögliche Plaquebildung wird dabei durch die Zugabe von Proteinen simuliert [106].

Tabelle 2: „Künstliche Speichel“ für Korrosionsprüfungen von metallischen Dentallegierungen [106]

Speichel	Zusammensetzung
DIN 13927	0,1 M Milchsäure, 0,1 M NaCl, in aqua dest. (pH = 2,3)
CEN / ISO	0,7 gl ⁻¹ NaCl, 0,26 gl ⁻¹ Na ₂ HPO ₄ , 0,33 gl ⁻¹ KSCN, 0,2 gl ⁻¹ K ₂ HPO ₄ , 1,5 gl ⁻¹ NaHCO ₃ , 1,2 gl ⁻¹ KCl in aqua dest.
Tani und Zucchi	0,7 gl ⁻¹ NaCl, 0,2 gl ⁻¹ K ₂ HPO ₄ , 0,26 gl ⁻¹ Na ₂ HPO ₄ , 0,33 gl ⁻¹ KSCN, 1,5 gl ⁻¹ NaHCO ₃ , 1,2 gl ⁻¹ KCl, 0,13 gl ⁻¹ Harnstoff in aqua dest.
Goehlich und Mitarb.	1,5 gl ⁻¹ KCl, 1,5 gl ⁻¹ NaHCO ₃ , 0,5 gl ⁻¹ Na ₂ HPO ₄ 2H ₂ O, 0,5 gl ⁻¹ KSCN, 0,9 gl ⁻¹ Milchsäure in aqua dest., pH = 5,2 bis 5,4
Ringer-Lösung	8,6 gl ⁻¹ NaCl, 0,3 gl ⁻¹ KCl, 0,33 gl ⁻¹ CaCl ₂ H ₂ O in aqua dest.
Fusayama	0,4 gl ⁻¹ NaCl, 0,4 gl ⁻¹ KCl, 0,795 gl ⁻¹ CaCl ₂ 2H ₂ O, 0,69 gl ⁻¹ Na ₂ HPO ₄ 2 H ₂ O, 0,005 gl ⁻¹ Na ₂ S 9 H ₂ O, 1 gl ⁻¹ Harnstoff in aqua dest.

In Anlehnung an DIN EN ISO 10271:2011[47], kamen im Rahmen dieser Untersuchung für den elektrochemischen Test zwei verschiedene Elektrolyte zum Einsatz.

Dies waren zum einen, eine isotone Lösung auf der Basis von 0,9 % Natriumchlorid (NaCl) mit einem pH-Wert von 6,5 und zum anderen künstlicher Speichel (0,1 M NaCl-Milchsäure), bestehend aus 0,1 molarem Natriumchlorid (NaCl) (0,5844 g pro 100 ml) und 0,1 molarer Milchsäure ($C_3H_6O_3$) (20,66 ml pro 100 ml) mit einem stark sauren pH-Wert von 2,3. Für die Durchführung des statischen Immersionstest kam, in Anlehnung an den elektrochemischen Test, künstlicher Speichel (0,1 M NaCl-Milchsäure) zum Einsatz.

Bei allen Versuchen betrug die Temperatur der eingesetzten Elektrolyte $37 \pm 1^\circ C$.

3.2 Methode

3.2.1 Elektrochemischer Test

3.2.1.1 Vorbereitung der Proben für den elektrochemischen Test

Die runden Prüfkörper, mit einem Durchmesser von $\varnothing = 10$ mm und einer Dicke $d = 2$ mm ($A = 0,78$ cm²), wurden in Anlehnung an die Richtlinien der Norm DIN EN ISO 10271:2011 [47] vorbehandelt.

Um die Prüfkörper während des Versuches im Elektrolyten positionieren zu können, wurde jeweils an den Angusskanal der Probe mittels Punktschweißen ein Kobalt-Chrom-Draht angebracht. Dabei wurde der Drahtteil, der sich in der Elektrolytlösung befand, mit einem Schrumpfschlauch aus Silikon zur elektrischen Isolation überzogen. Weiterhin wurden die Proben, bis auf eine kreisrunde Probestirnfläche von $0,78$ cm², spaltfrei in korrosionsresistentem Kunststoff Palavit G (Heraeus Kulzer) eingebettet (Abbildung 4).

Nach dem Einbetten wurden die Probestirnflächen mittels Siliciumcarbid-Papier mit aufsteigender Körnung (SiC 180, SiC 320, SiC 600, SiC 1200) unmittelbar vor Versuchsbeginn auf der Schleif- und Poliermaschine MetaServ 2 (Buehler)

3 Material und Methode

unter Wasserkühlung geschliffen, um möglichst praxisnahe Verhältnisse zu schaffen. Dabei wurde systematisch die Schleifrichtung variiert. Nach dem Schleifen wurden die Prüfkörper auf Risse und Spalten untersucht. Die intakten Prüfkörper wurden dann noch mittels Ethanol (C_2H_5OH) im Ultraschallbad für vier Minuten gereinigt, mit destilliertem Wasser abgespült und anschließend an der Luft getrocknet.

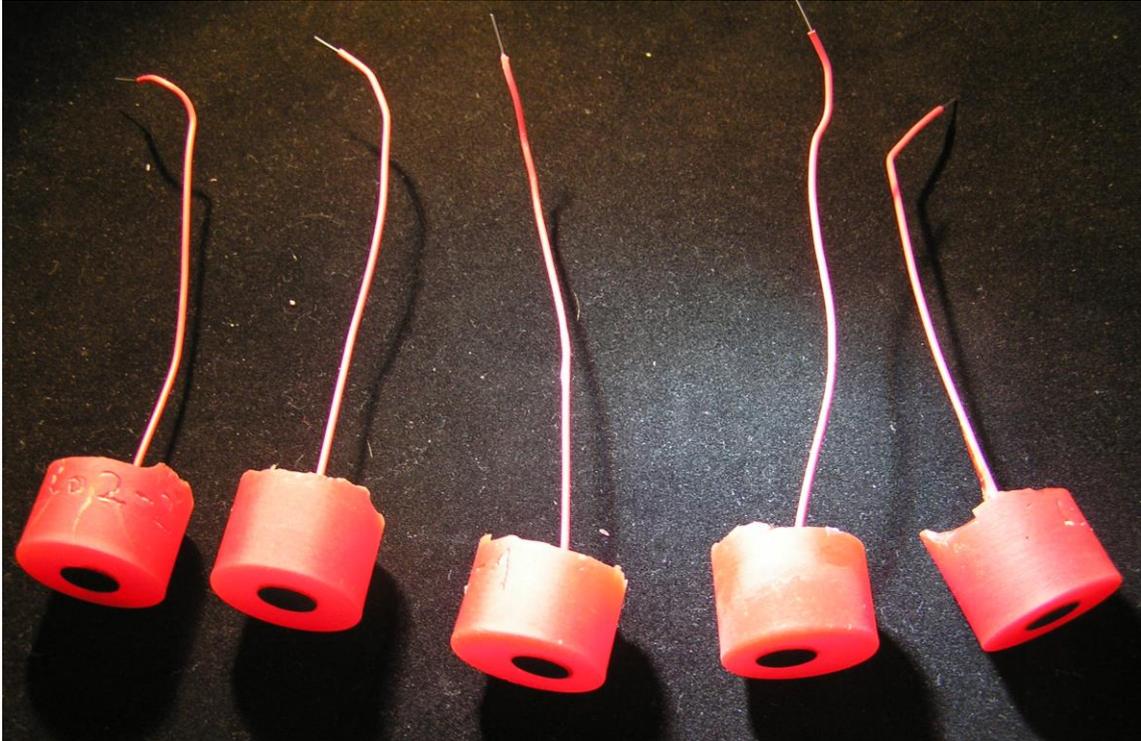


Abbildung 4: In Pallavit G eingebettete Prüfkörper

3.2.1.2 Versuchsaufbau des elektrochemischen Tests

Der Versuchsaufbau erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO 10271:2011 [47]. In Abbildung 5 ist der schematische Aufbau der Apparatur dargestellt.

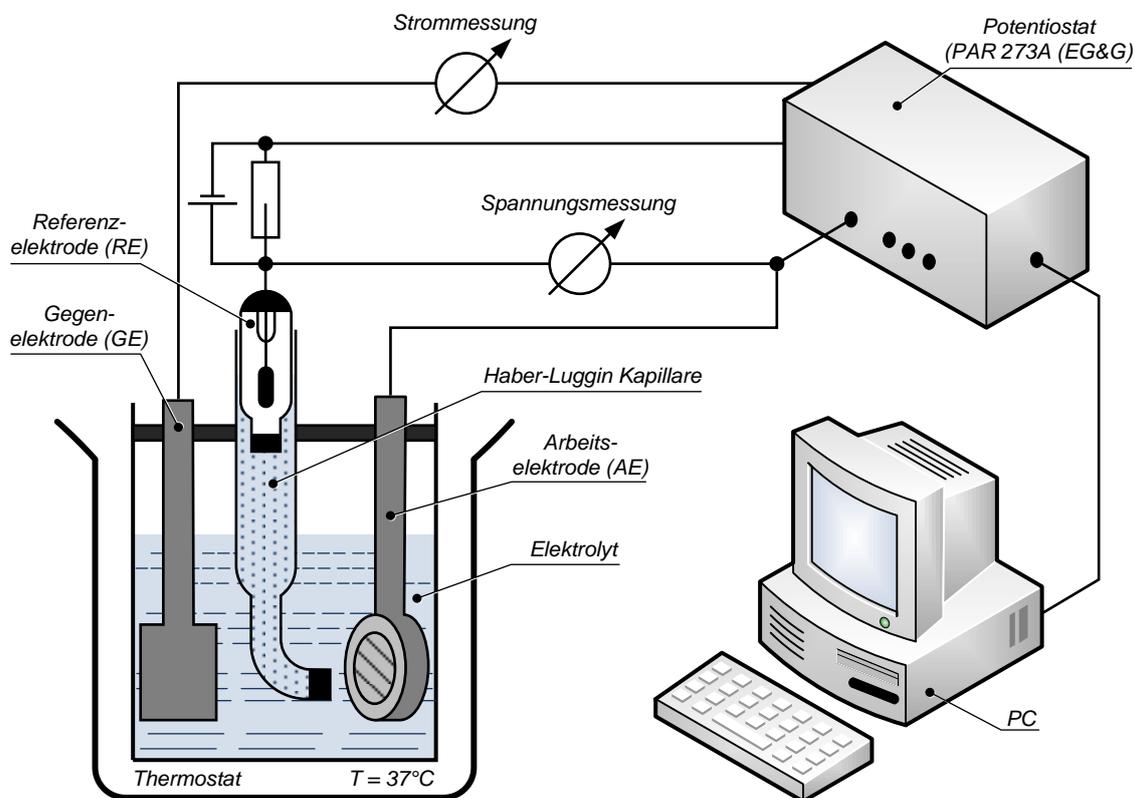


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Versuchseinrichtung

Die doppelwandige elektrochemische Messzelle wurde mit 100 ml Elektrolytlösung gefüllt. Wie bereits in Abschnitt 3.1.2 erwähnt, wurde der elektrochemische Test einmal mit 0,9 % NaCl und einmal mit 0,1 M NaCl-Milchsäure durchgeführt.

Über einen externen Temperierkreislauf (Wasserbad) wurde sichergestellt, dass der Versuch konstant bei der geforderten Temperatur von $37 \pm 1^{\circ}\text{C}$ abließ.

Wie aus der Abbildung 5 und Abbildung 6 zu entnehmen ist, wurden zur Durchführung des elektrochemischen Tests drei Elektroden, Referenzelektrode (RE), Gegenelektrode (GE), und Arbeitselektrode (AE), die den Prüfkörper darstellte, benötigt. Als Referenzelektrode diente eine gesättigte Kalomelektrode (SCE) mit Haber-Lugginkapillare (Nr. 6.0733.100), die gegenüber der Normalwasser-

stoffelektrode ein Standardpotential von $E^0 = +0,241 \text{ V}$ hat. Als Gegenelektrode diente ein in die Elektrolytlösung eingebrachter Graphitstab (PHYWE Nr. 44512-00). Der Kontakt zwischen den Elektroden wurde über den Elektrolyten hergestellt, so dass sich zwischen Arbeitselektrode und Referenzelektrode ein Potential einstellte und dadurch der Strom $I \text{ (A)}$ zwischen Arbeitselektrode und Gegenelektrode bestimmt werden konnte. Zur Messung der Potentiale diente ein rechnergesteuerter Potentiostat (PAR 273 A, EG & G) (Abbildung 6).



Abbildung 6: Potentiostat links im Bild. Rechts ist die Korrosionszelle dargestellt, bestehend aus einer doppelwandigen elektrochemischen Messzelle mit Drei-Elektrodenanordnung

3.2.1.3 Versuchsdurchführung des elektrochemischen Tests

Eine Entlüftung der Elektrolyte vor Versuchsbeginn mittels Stickstoff (99,996 %) wurde nicht durchgeführt.

Zunächst erfolgte die außenstromlose Bestimmung des Ruhepotentials (E_{corr}) über einen Zeitraum von zwei Stunden.

Anschließend wurde die potentiodynamische Polarisation, wie in der DIN EN ISO 10271:2011 [47] gefordert, bei einem Startpotential von $-150 \text{ V vs. } E_{\text{corr}}$ mit einer Schrittgeschwindigkeit dE/dt von 1 mV/s gestartet. Die potentiodynamische Polarisation wurde bis zu einem Potential von 1 V durchgeführt.

3 Material und Methode

Als Auswertkriterien dienen in Anlehnung an DIN EN ISO 10271:2011 [47] von jeder Messung die folgenden Parameter:

- E_{corr} [mV] nach 2h (Ruhepotential bzw. Korrosionspotential)
- $E(-6)$ [mV] (Potential bei Stromdichte 10^{-6} A/cm²)
- $E(-5)$ [mV] (Potential bei Stromdichte 10^{-5} A/cm²)
- E_z [mV] (Gleichgewichtspotential)
- E_{p-1} [mV] (Durchbruchpotential 1 bzw. Lochkorrosionspotential 1)
- E_{p-2} [mV] (Durchbruchpotential 2 bzw. Lochkorrosionspotential 2)
- i_{p-1} [μ A/cm²] (Stromdichte beim Durchbruchpotential E_{p-1})
- i_{p-2} [μ A/cm²] (Stromdichte beim Durchbruchpotential E_{p-2})
- i_{corr} [mA/cm²] (Korrosionsstromdichte)
- $i_{(300\text{ mV})}$ [μ A/cm²] (Stromdichte beim Potential 300 mV)
- $i_{(300\text{ mV}+E_z)}$ [μ A/cm²] (Stromdichte beim Potential 300 mV bezogen auf das Gleichgewichtspotential)
- $i_{(500\text{ mV})}$ [μ A/cm²] (Stromdichte beim Potential 500 mV)
- β_a (anodische Tafelkonstante)
- β_c (kathodische Tafelkonstante)
- R_p (Polarisationswiderstand)

Von den oben genannten Parametern sind gemäß DIN EN ISO 10271:2011 [47] die Parameter E_{corr} nach 2h, E_z , E_p und $i_{(300\text{ mV})}$ unabdingbar.

Am Ruhepotential (E_{corr}) ist kein Strom messbar. Deshalb wird ein fiktiver Korrosionsstrom (i_{corr}) bestimmt. Dazu legt man zwei Tangenten an den kathodischen und anodischen Teil der Stromdichte-Potential-Kurve an und bestimmt ihre Steigungen (Tafelkonstanten: β_a , β_c). Mittels der Steigungen kann dann der Schnittpunkt der Tangenten berechnet werden, was dem Korrosionsstrom (i_{corr}) entspricht [2], [107].

In ähnlicher Weise wird das Durchbruchpotential (E_p) bestimmt. Dazu legt man Tangenten im Passivstrombereich und im Wiederanstiegsbereich der Stromdichte-Potential-Kurve an. Der Schnittpunkt dieser Tangenten markiert dann das Durchbruchpotential (E_p) [108].

Die Abbildung 7 zeigt nochmals schematisch, wie der Korrosionsstrom (i_{corr}) und das Durchbruchpotential (E_p) ermittelt wurden.

Der Polarisationswiderstand (R_p) könnte ebenfalls berechnet werden, da er allerdings nicht Gegenstand der Auswertung war, wurde auf seine Berechnung verzichtet.

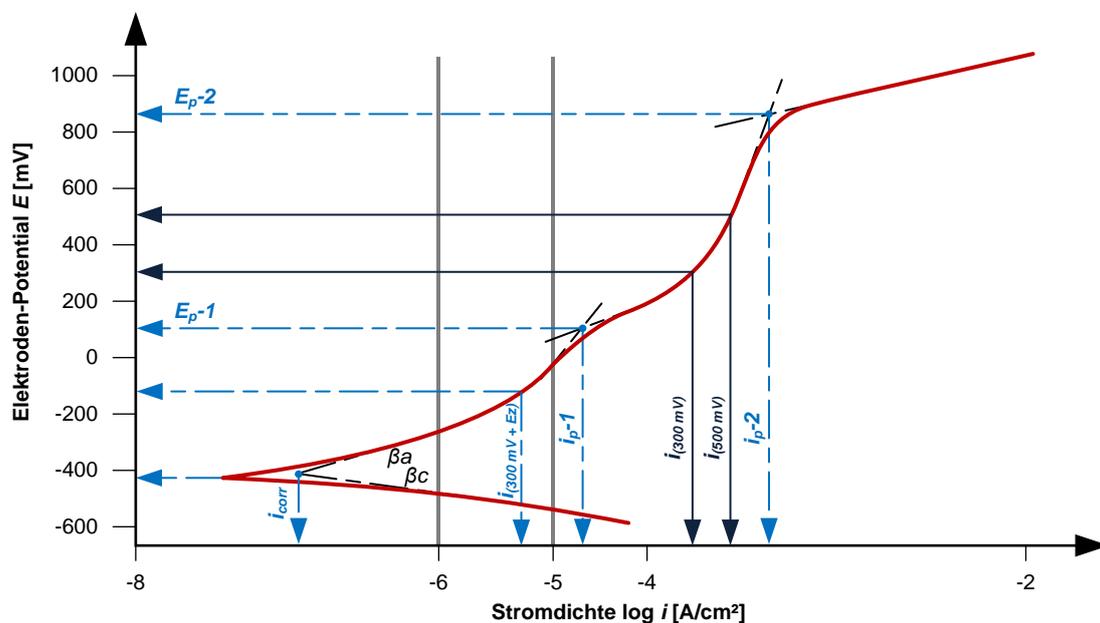


Abbildung 7: Schema einer potentiodynamisch gewonnenen Stromdichte-Potential-Kurve, die zeigt, wie die Parameter i_{corr} und E_p bestimmt wurden.

3.2.1.4 Analytische Auswertung des elektrochemischen Tests

Nach Beendigung eines Versuchsdurchlaufs wurde von jeder Probe die jeweilige Elektrolytlösung mittels einem ICP-OES Spektrometer Optima 4300 DV (Perkin-Elmer) (siehe Abbildung 8) qualitativ und quantitativ hinsichtlich der in Lösung gegangenen Korrosionsprodukte analysiert. Zur Kalibrierung wurden Standardlösungen unter Verwendung der Testlösung angesetzt. Jedes Legierungselement, welches in Lösung gegangen ist, wurde in einem Messdurchlauf bei zwei verschiedenen Wellenlängen bestimmt. Anschließend wurden daraus die Mittelwerte berechnet. Die Nachweisempfindlichkeit der Konzentrationen der untersuchten Legierungselemente lag bei $<0,03$ mg/l (blank detection limit). Die Menge der freigesetzten Legierungselemente wurde auf $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ umgerechnet.

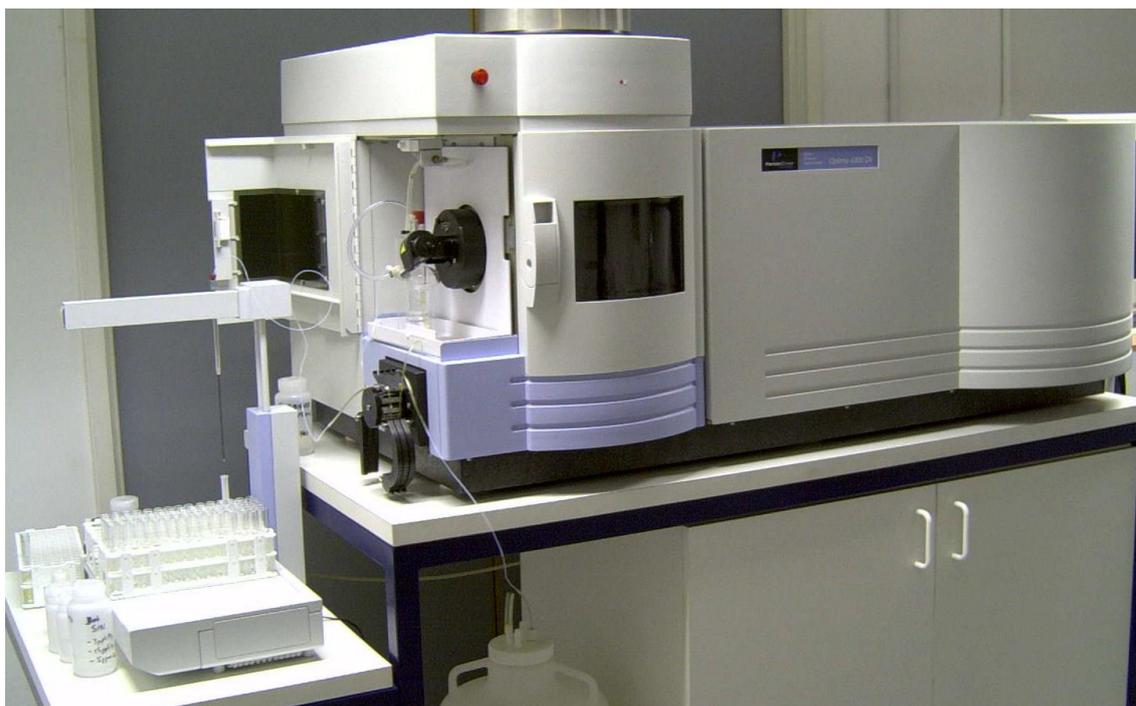


Abbildung 8: ICP-OES Spektrometer Optima 4300 DV (Perkin-Elmer)

Um zu kontrollieren, wie das analytische Ergebnis mit den Werten aus den potentiodynamischen Messkurven korreliert, bedient man sich des Faraday'schen Gesetzes (Gl. 1), mittels dessen der Massenverlust für das Legierungselement, welches hauptsächlich in Lösung geht, näherungsweise ermittelt werden kann. Die Werte für die Ladungsmenge Q können dabei aus den potentiodynami-

schen Messkurven berechnet werden, indem die Fläche unter der potentiodynamischen Kurve integriert wird. Bezüglich der Flächenintegration wurde im Rahmen dieser Untersuchung, zum einen die Ladungsmenge über die gesamte Messkurve ermittelt, zum anderen ging man in Anlehnung an *Maranche et al.* [14] und *Reclaru et al.* [76] nach der Zonencoulometrie vor.

Während dabei sowohl *Maranche et al.*, als auch *Reclaru et al.* die Stromdichte-Potential-Kurve in drei Zonen unterteilen, unterscheiden sie sich jedoch in der Einteilung der jeweiligen Zonen, wie dies aus Abbildung 9 und Abbildung 10 ersichtlich ist.

Erfolgt die Einteilung nach *Reclaru et al.*, entspricht dabei die Summe der drei Ladungsmengen der Einzelzonen I, II und III in etwa der Ladungsmenge der integrierten Gesamtfläche, während nach *Maranche et al.*, näherungsweise die Ladungsmenge der Einzelzone III der Ladungsmenge der integrierten Gesamtfläche entspricht. Folglich entspricht auch der berechnete Massenverlust der Einzelzonen I, II und III nach *Reclaru et al.*, sowie der berechnete Massenverlust der Einzelzonen III nach *Maranche et al.*, näherungsweise dem berechneten Massenverlust der gesamten Fläche.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde zunächst für die Gesamtfläche der Massenverlust berechnet. Anschließend wurden zur Absicherung noch die Massenverluste für die Flächen I, II und III nach *Reclaru et al.*, sowie für die Fläche III nach *Maranche et al.* berechnet.

Allerdings ergeben sich bei dieser Vorgehensweise größere Massenverluste für die entsprechenden Legierungselemente. Denn so werden bei dieser Berechnung für ein bestimmtes Legierungselement alle anderen Legierungsanteile unwillkürlich miteinbezogen. Um jedoch eine realistischere Berechnung des Massenverlustes des einzelnen Legierungselementes zu bekommen, wurde zusätzlich im Rahmen dieser Untersuchung noch der berechnete Massenverlust, der 100 % entspricht, auf den prozentualen Anteil des Legierungselements reduziert.

Faraday'sche Gesetz:

$$\Delta m = \frac{M \cdot Q}{z \cdot F} \quad (\text{Gl. 1})$$

Δm abgeschiedene Masse in g

M molare Masse in g/mol

z elektrochemische Wertigkeit des korrodierten Materials

F Faraday-Konstante in AS/mol; $F=96485$ C/mol

Q durch die Anodenfläche geflossene Ladungsmenge C/cm²

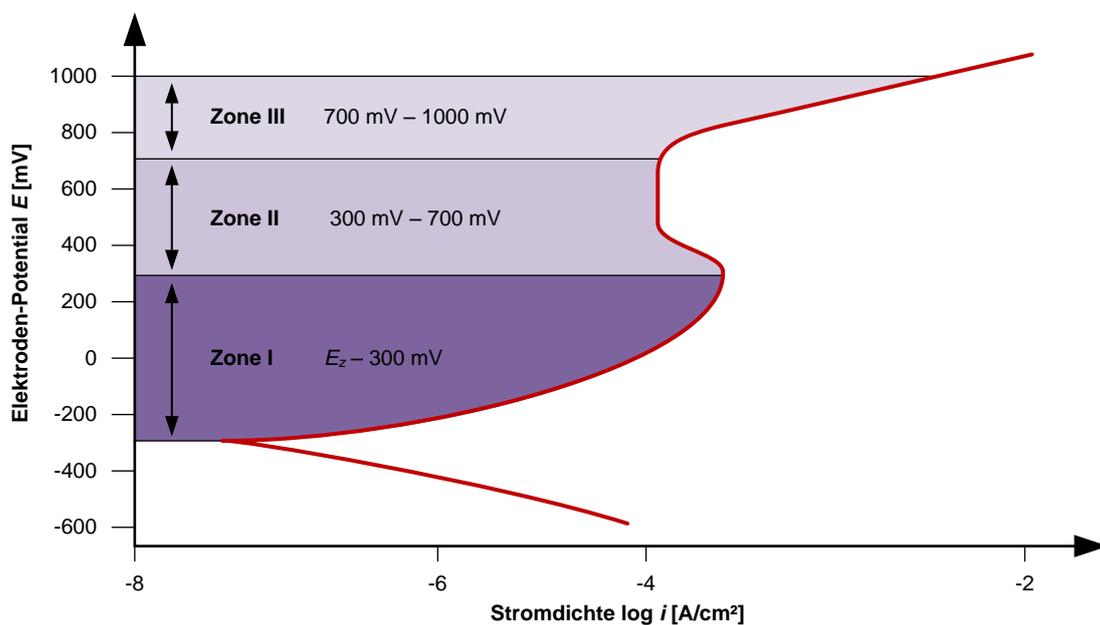


Abbildung 9: Zonencoulometrie in Anlehnung an Reclaru et al. [76]

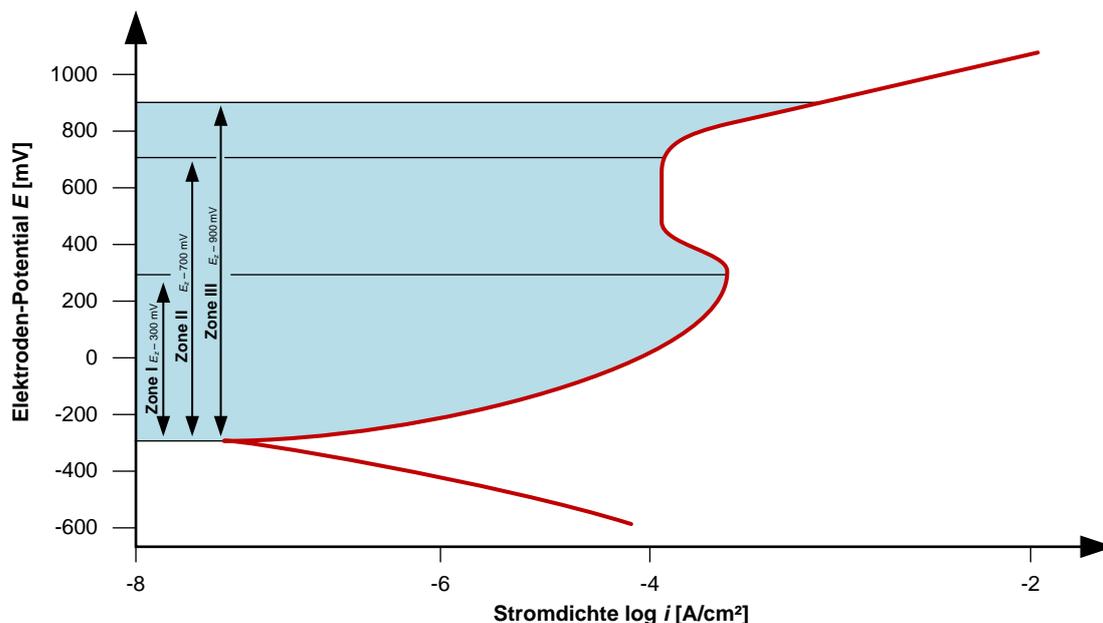


Abbildung 10: Zonencoulometrie in Anlehnung an *Maranche et al.* [14]

3.2.1.5 Statistische Auswertung

Aus den potentiodynamischen Messkurven wurden in Stichproben die Massenverluste sowohl rechnerisch, als auch analytisch ermittelt.

In einem t-Test wurden für das Legierungselement Kobalt die unterschiedlichen Stichproben miteinander verglichen und die Unterschiede auf Signifikanz getestet. Die analytischen Stichproben wurden dabei mit den berechneten Stichproben $\Delta m_{\text{Agés}}$, $\Delta m_{\text{Q1,2,3}}$, Δm_{Q6} sowie Δm_{Anteil} verglichen. Letztere Stichproben sind die auf den Kobalt-Legierungsanteil reduzierten Massenverluste, die auf den Stichproben $\Delta m_{\text{Agés}}$ basieren. In einem weiteren Vergleich wurden die Stichproben $\Delta m_{\text{Q1,2,3}}$ und Δm_{Q6} ebenfalls auf den Legierungsanteil reduziert und nochmals mit den analytischen Proben verglichen.

Für die statistische Auswertung wurde das Statistik-Programm PASW Statistics 18 (SPSS 2009) verwendet.

Für die Ergebnisfindung wurden zuerst die Stichproben-Mittelwerte M nach der Formel:

$$\bar{x} = M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Gl. 2})$$

n Anzahl der Proben

sowie die Standardabweichungen oder Streuungen nach der Formel:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (\text{Gl. 3})$$

n Anzahl der Proben

$n - 1$ Freiheitsgrad

berechnet.

Der t-Test baut auf den Mittelwerten und den Standardabweichungen der zu vergleichenden Stichproben auf und soll Auskunft geben, wie wahrscheinlich es ist, dass diese Stichproben aus der gleichen Grundeinheit stammen, bzw. dass der vorhandene Unterschied nur zufallsbedingt ist.

Dazu werden nun zuerst folgende Hypothesen aufgestellt:

- 1. H_0 Nullhypothese:** Die wahren Mittelwerte sind gleich, ein Unterschied ist nicht zufallsbedingt
- 2. H_1 Alternativhypothese:** Die wahren Mittelwerte sind tatsächlich verschieden.

Für die Beurteilung wird noch eine Irrtumswahrscheinlichkeit α angenommen, die üblicherweise bei 1 % bis maximal 5 % liegt und hier mit 5 % festgelegt wurde. Dies bedeutet, die Nullhypothese ist bei einem Wert anzunehmen, der über α liegt, bzw. muss abgelehnt werden, wenn der Wert unter α liegt. Es trifft dann die zweite Hypothese zu, in dem ein Unterschied bei den Stichproben als signifikant bestätigt wird, also der Unterschied als statistisch sehr wahrscheinlich gesichert gilt.

Die Berechnung des t-Wertes erfolgt nach folgender Formel:

$$t_{err} = \frac{\bar{x}_A - \bar{x}_B}{\sqrt{\frac{s_A^2}{n_A} + \frac{s_B^2}{n_B}}} \quad (\text{Gl. 4})$$

bzw. bei Annahme gleicher Varianzen

$$t_{err} = \frac{\bar{x}_A - \bar{x}_B}{s_G} \cdot \sqrt{\frac{n_A \cdot n_B}{n_A + n_B}} \quad (\text{Gl. 5})$$

$$s_G = \sqrt{\frac{s_A^2(n_A - 1) + s_B^2(n_B - 1)}{n_A + n_B - 2}} \quad (\text{Gl. 6})$$

Die Signifikanzaussage, die im PASW-Ausdruck als Dezimalzahl kleiner 1 erscheint, basiert auf dem Vergleich des errechneten t-Wertes mit dem kritischen t-Wert, der tabellarisch in Abhängigkeit von der Irrtumswahrscheinlichkeit und Probengröße zu finden ist. Ausgang für die Berechnung ist dabei eine statistische Normalverteilung.

Heutige Statistikprogramme weisen neben dem Signifikanzwert, Mittelwert und Standardabweichung noch weitere Werte aus. Bei 2-seitiger Signifikanz, wie im vorliegenden Test, halbiert sich die Irrtumswahrscheinlichkeit, d.h. der Dezimalwert für 5 % ist 0,025.

3.2.2 Statischer Immersionstest

3.2.2.1 Vorbereitung der Proben für den statischen Immersionstest

In Anlehnung an die Richtlinien der Norm DIN EN ISO 10271:2011 [47], wurden die Oberflächen der rechteckigen Proben zunächst mittels Siliciumcarbid-Papier mit aufsteigender Körnung (SiC 180, SiC 320, SiC 600, SiC 1200) unmittelbar vor Versuchsbeginn auf der Schleif- und Poliermaschine MetaServ 2 (Buehler)

unter Wasserkühlung geschliffen, um möglichst praxisnahe Verhältnisse zu schaffen. Dabei wurde systematisch die Schleifrichtung variiert. Anschließend wurden die Proben optisch auf Oberflächenveränderungen in Form von Rissen, Spalten, Lunker, Seigerungen etc. untersucht. In Tabelle 9 im Anhang wurden die festgestellten Oberflächenveränderungen vermerkt.

Nach der optischen Untersuchung erfolgte die Vermessung der Prüfkörper mittels eines digitalen Messschiebers. Hierbei wurden die Länge und die Breite jeweils an zwei Stellen und die Höhe an sechs Stellen vermessen. Im Anschluss wurde die Oberfläche berechnet. Dabei betrug die Oberfläche der Prüfkörper im Mittel $0,7 \text{ cm}^2$. Die einzelnen Werte für die Oberflächen der Prüfkörper sind in der Tabelle 10 im Anhang aufgelistet.

Zum Schluss wurden die Prüfkörper dann noch mittels Ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) im Ultraschallbad für vier Minuten gereinigt, mit destilliertem Wasser abgespült und an der Luft getrocknet. Die Abbildung 11 zeigt exemplarisch die fünf fertig geschliffenen Prüfkörper der Legierung Co-1.

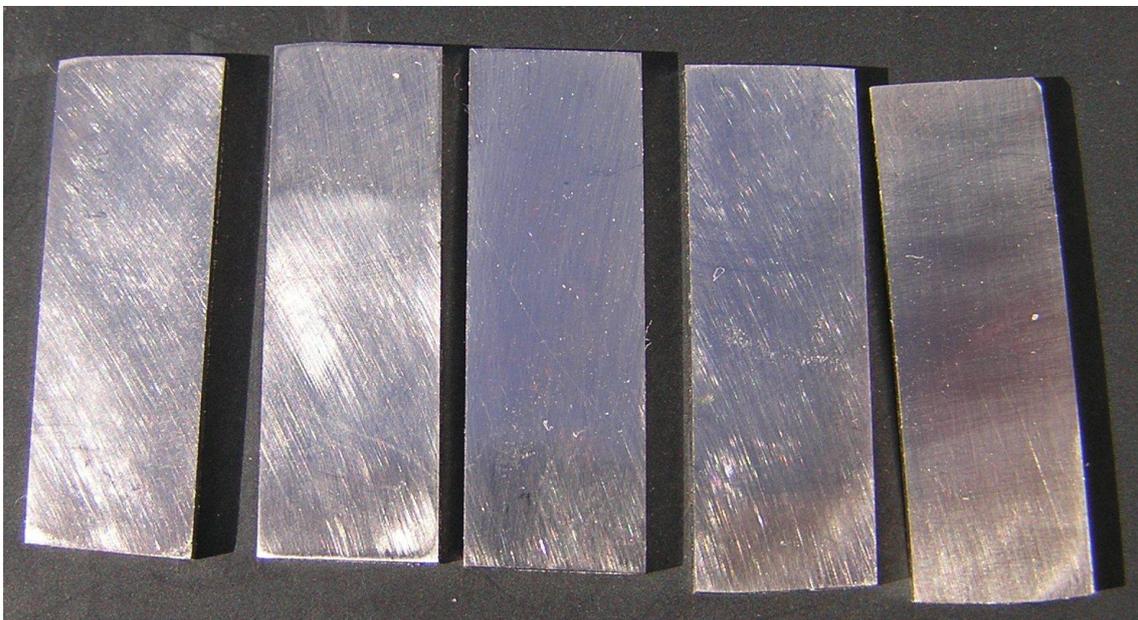


Abbildung 11: Prüfkörper der Legierung Co-1

3.2.2.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung des statischen Immersionstests

Jeder Prüfkörper wurde in ein separates 15 ml Kunststoffröhrchen (Polypropylen-Röhrchen), welches er nur an einer Mindestauflagelinie berührte, gegeben und mit 10 ml Elektrolyt (0,1 M NaCl-Milchsäure) befüllt (Abbildung 12). Anschließend wurden die Polypropylen-Röhrchen mit Verschlusskappen (blue caps) verschlossen, um ein Verdunsten der Lösung zu verhindern und in einem Inkubator konstant temperiert ($37 \pm 1^\circ\text{C}$).

Der Untersuchungszeitraum für den statischen Immersionstest betrug 42 Tage. Nach 1, 4, 7, 14, 21, 28, 35 und 42 Tagen ± 1 h wurden die Prüfkörper mit einer Kunststoffpinzette aus der Lösung entnommen und sofort in Polypropylen-Röhrchen mit neuer Elektrolytlösung gegeben. Die in den Polypropylen-Röhrchen verbliebene Lösung wurde konserviert, um später die korrodierten Bestandteile und deren Menge mittels eines ICP-OES Spektrometers Optima 4300 DV (Perkin-Elmer) zu bestimmen. Tabelle 3 verdeutlicht nochmals den zeitlichen Ablauf des statischen Immersionstests.

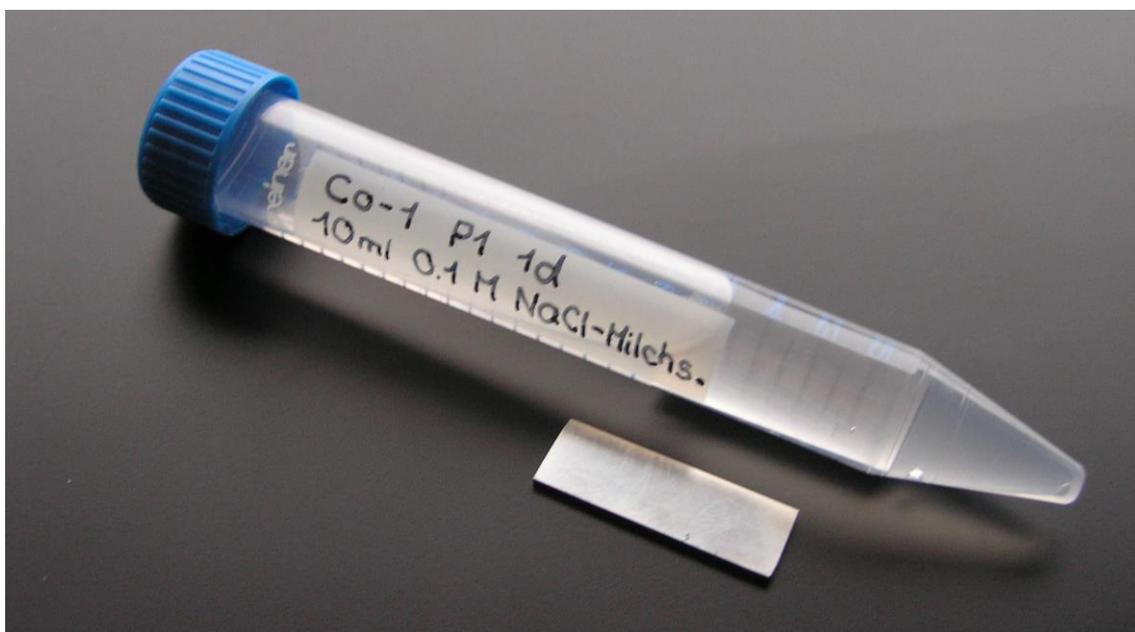


Abbildung 12: Proben für den statischen Immersionstest

Tabelle 3: zeitlicher Ablauf des statischen Immersionstests

Einlagerungsperioden	Tag des Probenwechsels
1 Tag \pm 1h	1. Tag
3 Tage \pm 1h	4. Tag
3 Tage \pm 1h	7. Tag
7 Tage \pm 1h	14. Tag
7 Tage \pm 1h	21. Tag
7 Tage \pm 1h	28. Tag
7 Tage \pm 1h	35. Tag
7 Tage \pm 1h	42. Tag

3.2.2.3 Analytische Auswertung des statischen Immersionstests

Die korrosiv kontaminierten Prüflösungen wurden bis zum Messtag eingefroren. Vor der Messung wurden sie durchmischt, um Rückstände an den Gefäßwänden zu vermeiden. Die Prüflösungen wurden dann mittels einem ICP-OES Spektrometers Optima 4300 DV (Perkin-Elmer) analog zur analytischen Auswertung des elektrochemischen Tests qualitativ und quantitativ hinsichtlich der in Lösung gegangenen Korrosionsprodukte je Flächeninhalt analysiert.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der Elektrochemischen Korrosionsmessungen

4.1.1 Messkurven

In den Abbildungen der nachfolgenden Abschnitten 4.1.1.1, 4.1.1.2 und 4.1.1.3 werden zunächst alle Mittelwerte der eingesetzten Legierungen jeweils in einem Diagramm dargestellt und können so miteinander verglichen werden.

Darüber hinaus werden die Legierungen Co-1 und Co-2 jeweils zusammen dargestellt, da bei der Legierung Co-2 ein Teil des Kobaltgehalts durch das Element Wolfram substituiert wurde. Somit kann aufgezeigt werden, wie sich die Substitution von Kobalt durch Wolfram auf die Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h), sowie die einzelnen korrosionsrelevanten Parameter, auswirkt.

Die Legierungen Co-3 und Co-4 haben den gleichen PRE-Wert. Um dies zu erreichen, musste die Substitution von Molybdän durch die doppelte Menge an Wolfram, bei gleichzeitiger Reduktion des Kobaltgehaltes, erfolgen. Um auch hier vergleichen zu können, wie sich diese Substitution auf die einzelnen Ruhepotentiale, sowie die korrosionsrelevanten Parameter auswirkt, werden die Legierungen Co-3 und Co-4 jeweils zusammen dargestellt.

Bei den elektrochemischen Korrosionsmessungen dienten zur Berechnung des Mittelwertes alle fünf Prüfkörper einer Legierung. Da allerdings in beiden Elektrolyten einige Prüfkörper zu sehr streuten, wurden diese nicht zur Berechnung des Mittelwertes herangezogen.

Im Elektrolyt 0,9 % NaCl streut bei Legierung Co-1 und Co-3 jeweils ein Prüfkörper und bei Legierung Co-2 sogar zwei. Folglich dienten bei den Legierungen Co-1 und Co-3 nur vier Prüfkörper und bei Legierung Co-2 nur drei Prüfkörper zur Berechnung des Mittelwertes.

Im Elektrolyt 0,1 M NaCl-Milchsäure streuten bei Legierung Co-3 zwei Prüfkörper und bei Legierung Co-4 streut ein Prüfkörper. Folglich wurden sie nicht in

die Wertung einbezogen, so dass bei Legierung Co-3 nur drei und bei Legierung Co-4 nur vier Prüfkörper zur Berechnung des Mittelwertes dienten.

Gründe, weshalb diese Prüfkörper zu sehr streuten, könnten eventuell sein, dass diese Prüfkörper fehlerhaft waren oder dass ein Fehler bei der Versuchsdurchführung aufgetreten ist.

4.1.1.1 Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h)

Die Bestimmung des Ruhepotentials ermöglicht eine erste Einschätzung der Legierung bezüglich ihrer Korrosionsbeständigkeit.

Die Bestimmung der Ruhepotentiale erfolgte gemäß der Beschreibung in Abschnitt 3.2.1.3. über einen Zeitraum von zwei Stunden.

Während in der nachfolgenden Abbildung 13 bis Abbildung 18 die Mittelwerte der Ruhepotentiale der vier experimentellen Legierungen Co-1 bis Co-4 bei Anwendung von zwei unterschiedlichen Elektrolyten (0,9 % NaCl und 0,1 M NaCl-Milchsäure) dargestellt sind, können die einzelnen Ruhepotentiale der jeweiligen Prüfkörper aus der Abbildung 70 bis Abbildung 77 im Anhang entnommen werden.

Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h) im Elektrolyt 0,9 % NaCl

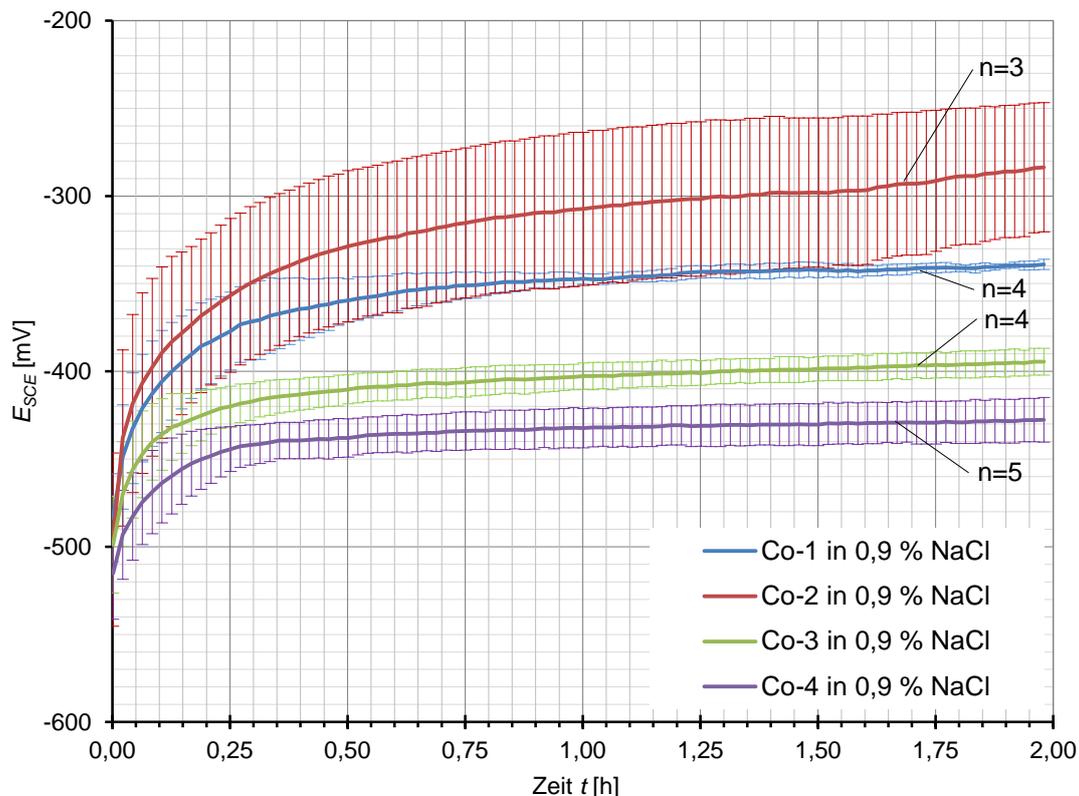


Abbildung 13: Vergleich der Mittelwerte der Ruhepotentiale der vier experimentellen Legierungen Co-1 bis Co-4 in 0,9 % NaCl

Aus Abbildung 13 wird ersichtlich, dass zu Beginn der Messungen die Ruhepotentialwerte aller vier Legierungen bei ca. -500 mV liegen. Während die Legierungen Co-3 und Co-4 sich bereits nach ca. 30 Minuten stabilisieren, steigen die Ruhepotentialwerte der Legierungen Co-1 und Co-2 weiter an und beginnen sich erst nach ca. 75 Minuten zu stabilisieren. Die Legierung Co-2 zeigt sogar im letzten Viertel der Messzeit nochmals eine leichte Steigerung der Messkurve. Generell fällt auf, dass die beiden Legierungen mit dem höheren Chromgehalt (Legierung Co-1 und Legierung Co-2), positivere Ruhepotentiale haben. Dabei weist die Legierung Co-2, bei der 6 % des Kobaltgehaltes durch Wolfram ersetzt wurde, ein um ca. 60 mV positiveres Ruhepotential als Legierung Co-1 auf. Auffallend ist auch, dass Legierung Co-2 die größte Standardabweichung hat. Die Bandbreite der Ruhepotentiale nach zwei Stunden erstreckt sich zwischen -430 mV (Legierung Co-4) und -275 mV (Legierung Co-2).

4 Ergebnisse

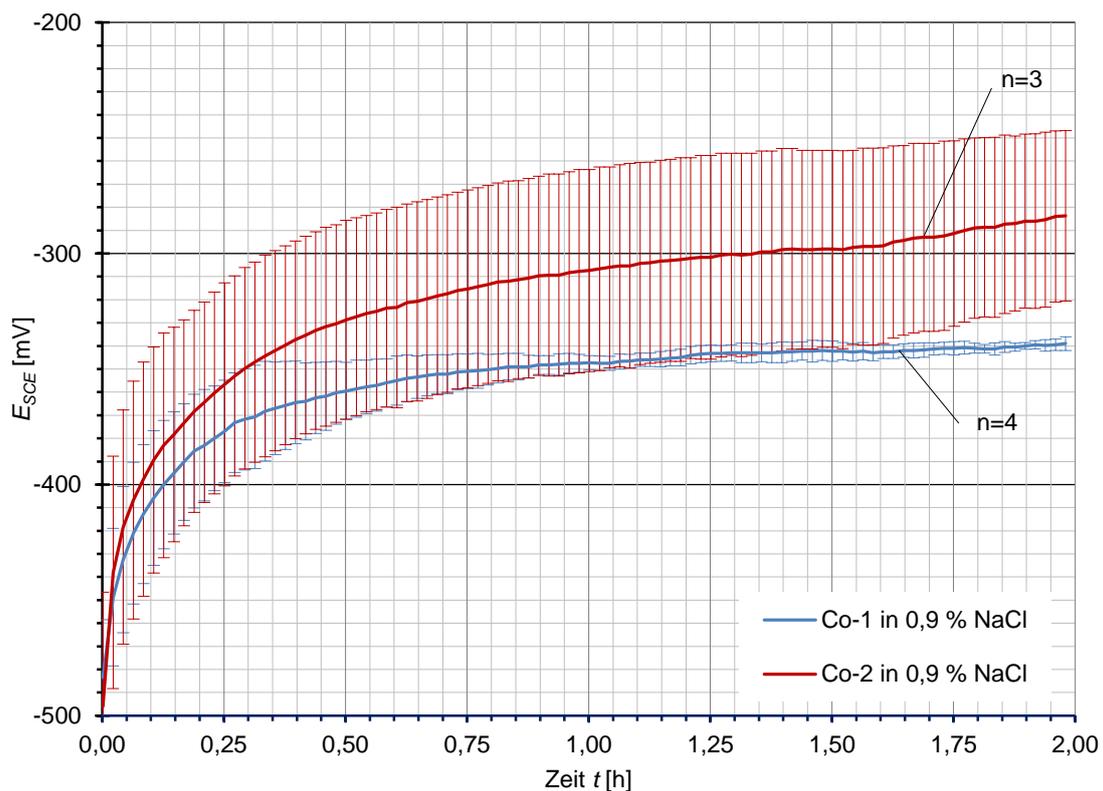


Abbildung 14: Vergleich der Mittelwerte der Ruhepotentiale der experimentellen Legierungen Co-1 und Co-2 in 0,9 % NaCl

Abbildung 14 verdeutlicht nochmals die oben genannten Ergebnisse für Legierung Co-1 und Co-2. Auffallend ist, dass bei Legierung Co-1 die Standardabweichung mit der Messdauer immer kleiner wird, während bei Legierung CO-2 diese über die gesamte Messdauer hinweg in etwa konstant bleibt.

4 Ergebnisse

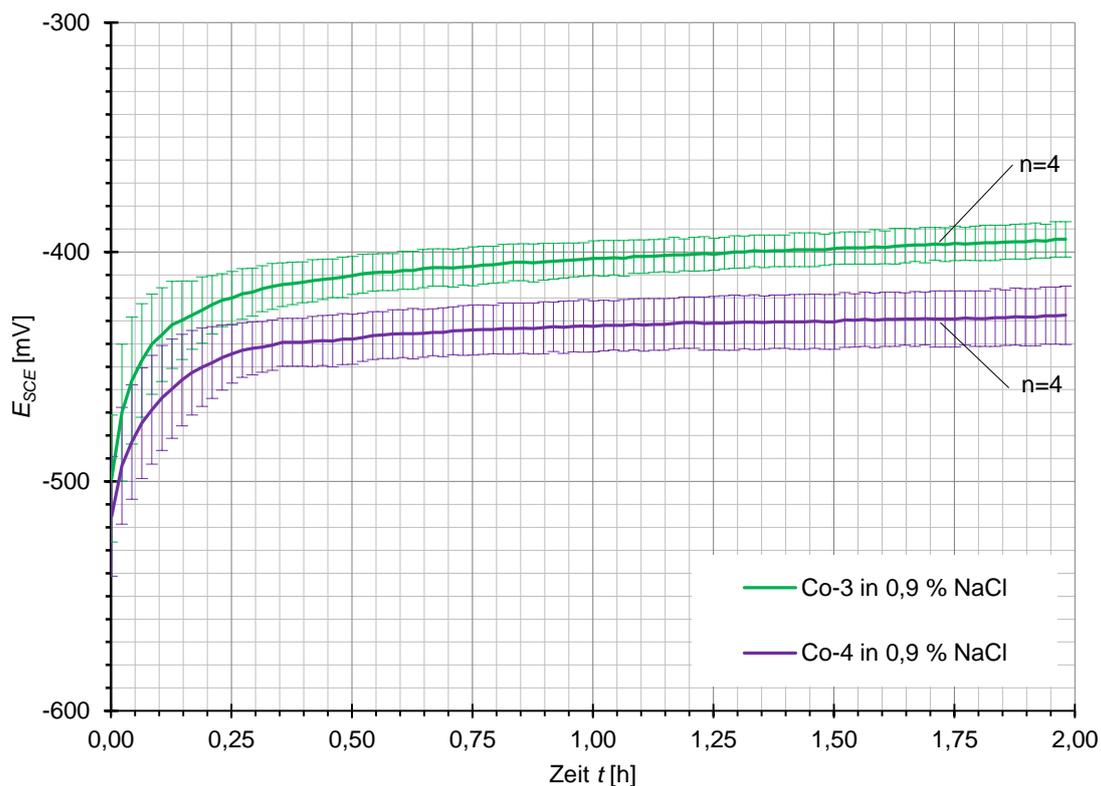


Abbildung 15: Vergleich der Mittelwerte der Ruhepotentiale der experimentellen Legierungen Co-3 und Co-4 in 0,9 % NaCl

Auch Abbildung 15 verdeutlicht nochmals die oben genannten Ergebnisse für die Legierungen Co-3 und Co-4. Bezüglich der Standardabweichung kann gesagt werden, dass diese über die gesamte Messdauer hinweg bei beiden Legierungen in etwa gleich bleibt. Obwohl diese Legierungen bezüglich ihrer Zusammensetzung am stärksten variieren, weisen sie einen ähnlichen Kurvenverlauf, bei annähernd gleichem Ruhepotential auf.

Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h) im Elektrolyt 0,1 M NaCl-Milchsäure

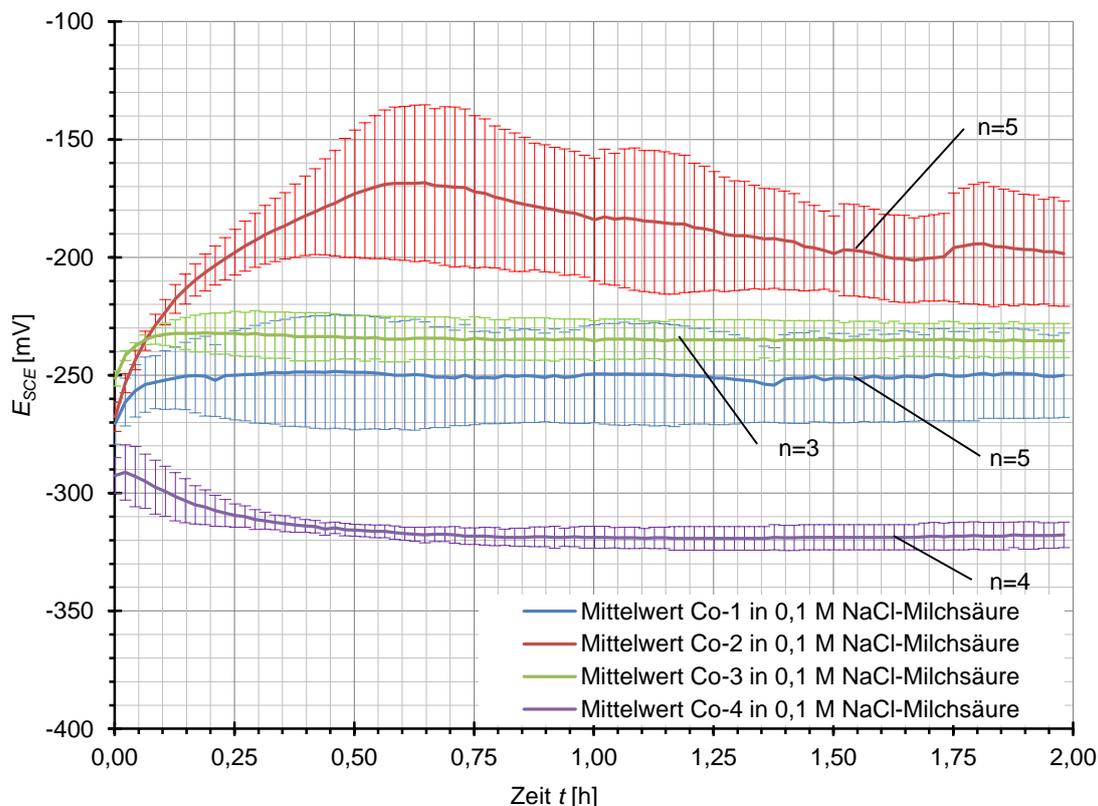


Abbildung 16: Vergleich der Mittelwerte der Ruhepotentiale der vier experimentellen Legierungen Co-1 bis Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Aus Abbildung 16 wird ersichtlich, dass bei allen Legierungen das Ruhepotential anfänglich bei etwa -250 bis -290 mV liegt. Während nur die Legierungen Co-1 und Co-3 einen ähnlichen Kurvenverlauf haben und sich bereits nach 15 Minuten stabilisieren, weichen die Kurven der Legierung Co-2 und Co-4 stark von diesem Verlauf ab. So ist der Kurvenverlauf der Legierung Co-4 fast spiegelbildlich zu denen von Legierung Co-3 und Co-1. Denn so fällt bei Legierung Co-4 anfänglich der Ruhepotentialwert um ca. 40 mV ab und stabilisiert sich nach 30 Minuten bei ca. -320 mV, um sich nach ca. 30 Minuten bei -320 mV einzupendeln. Die Legierung Co-2 hat den unruhigsten Kurvenverlauf. Sie hat nach ca. 30 Minuten ihren Höchstwert bei -170 mV und fällt zu Messende um ca. 30 mV auf den Ruhepotentialwert von -200 mV ab. Während anfänglich die Standardabweichung bei dieser Legierung gering ist, nimmt sie im Kurvenverlauf zu.

4 Ergebnisse

Bei den anderen drei Legierungen bleibt die Standardabweichung annähernd konstant, wobei diese bei Legierung Co-4 am geringsten ist. Die Bandbreite der Ruhepotentiale erstreckt sich nach zwei Stunden zwischen -320 mV (Legierung Co-4) und -200 mV (Legierung Co-2).

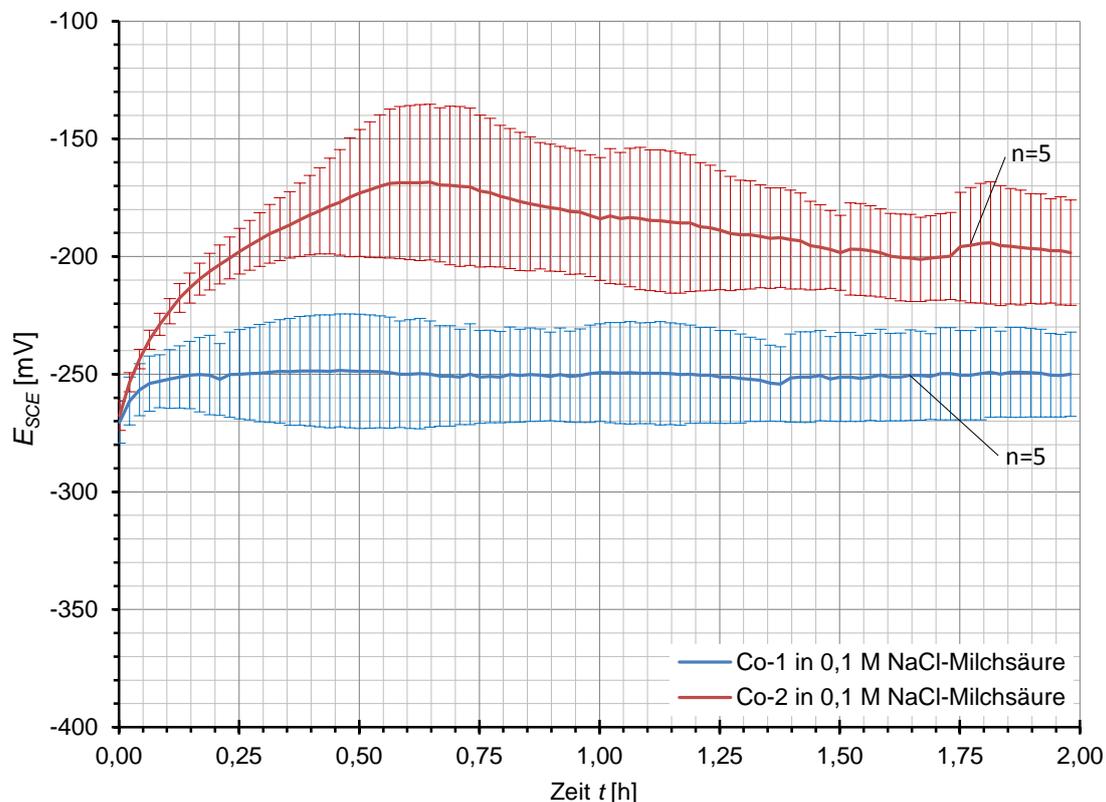


Abbildung 17: Vergleich der Mittelwerte der Ruhepotentiale der experimentellen Legierungen Co-1 und Co-2 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Abbildung 17 verdeutlicht nochmals die oben genannten Ergebnisse für Legierung Co-1 und Co-2. Bereits nach 15 Minuten haben beide Kurven den Wert ihres Ruhepotentials erreicht. Bei der Kurve der Legierung Co-1 kann bereits nach 15 Minuten von einem stabilen Wert ausgegangen werden, während bei der Kurve der Legierung Co-2 erst nach 90 Minuten eine Stabilisierung der Ruhepotentialwerte eintritt.

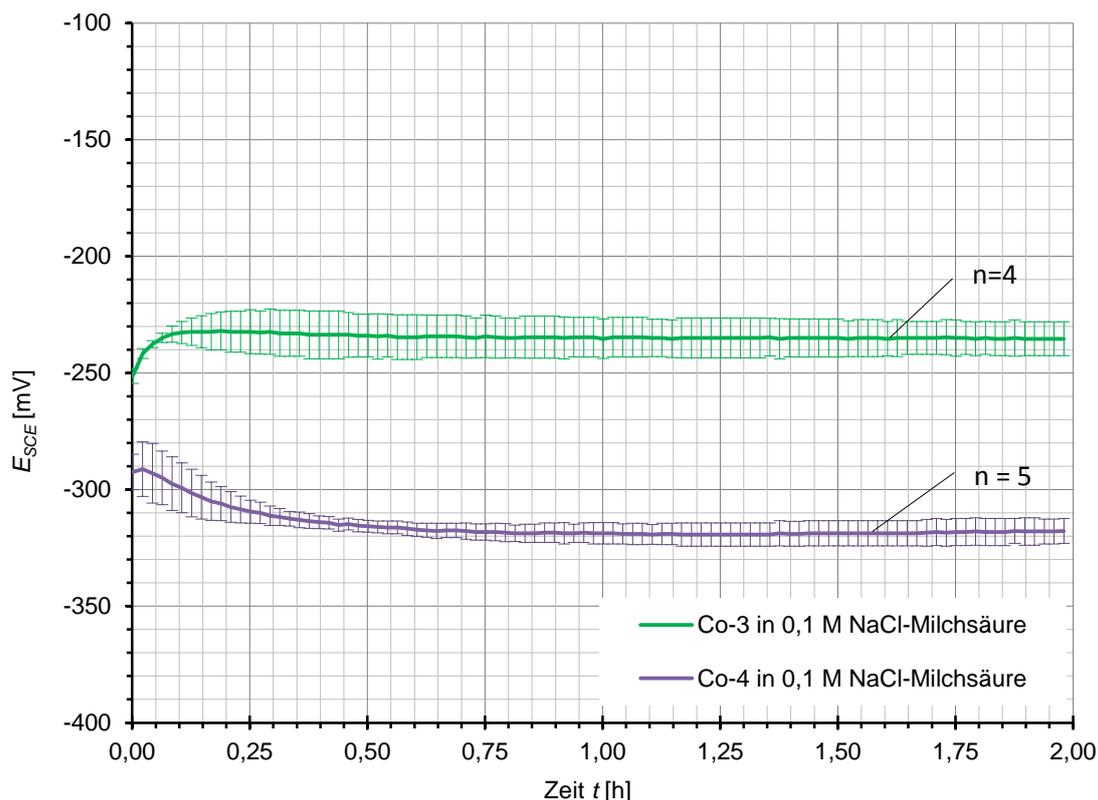


Abbildung 18: Vergleich der Mittelwerte der Ruhepotentiale der experimentellen Legierungen Co-3 und Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Abbildung 18 verdeutlicht nochmals den bereits erwähnten spiegelbildlichen Kurvenverlauf der Legierungen Co-3 und Co-4. Während bei der Legierung Co-3 die Stabilisierung bereits nach 10 Minuten eintritt, stabilisiert sich Legierung Co-4 erst nach 40 Minuten.

4.1.1.2 Potentiodynamische Messkurven

Der elektrochemische Test, der zur Erstellung der potentiodynamischen Messkurven diente, wurde gemäß der Beschreibung in Abschnitt 3.2.1.3 durchgeführt.

In der nachfolgenden Abbildung 19 bis Abbildung 24 wurden die potentiodynamischen Messkurven lediglich aus den Mittelwerten der vier experimentellen Legierungen Co-1 bis Co-4, bei Anwendung von zwei unterschiedlichen Elektrolyten (0,9 % NaCl und 0,1 M NaCl-Milchsäure), erstellt. Die potentiodynamischen Messkurven der jeweiligen Prüfkörper können aus den Abbildung 78 bis Abbildung 85 im Anhang entnommen werden.

Potentiodynamische Messkurven im Elektrolyt 0,9 % NaCl

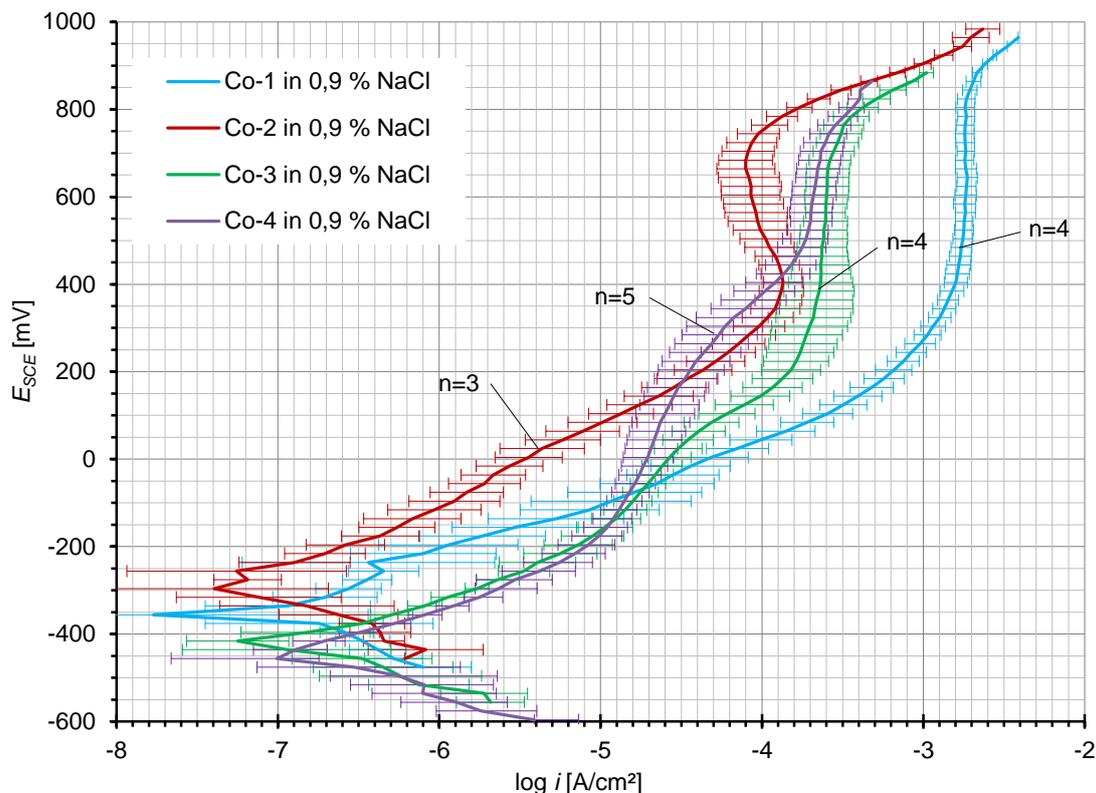


Abbildung 19: Vergleich der Mittelwerte der potentiodynamischen Messkurven der vier experimentellen Legierungen Co-1 bis Co-4 in 0,9 % NaCl

Abbildung 19 stellt die potentiodynamischen Messkurven der vier Legierungen dar. Alle Legierungen haben im Potentialbereich von 600-900 mV ein Durchbruchpotential (E_{p-2}). Während die Legierungen Co-1 und Co-2 einen deutlich erkennbaren Passivierungsbereich haben, ist bei den Legierungen Co-3 und Co-4 dieser in quasi in zwei Plateaueben unterteilt. Folglich besitzen diese Legierungen auch ein weiteres Durchbruchpotential (E_{p-1}). Gleichzeitig liegt bei diesen Legierungen auch ein niedrigeres Gleichgewichtspotential vor.

4 Ergebnisse

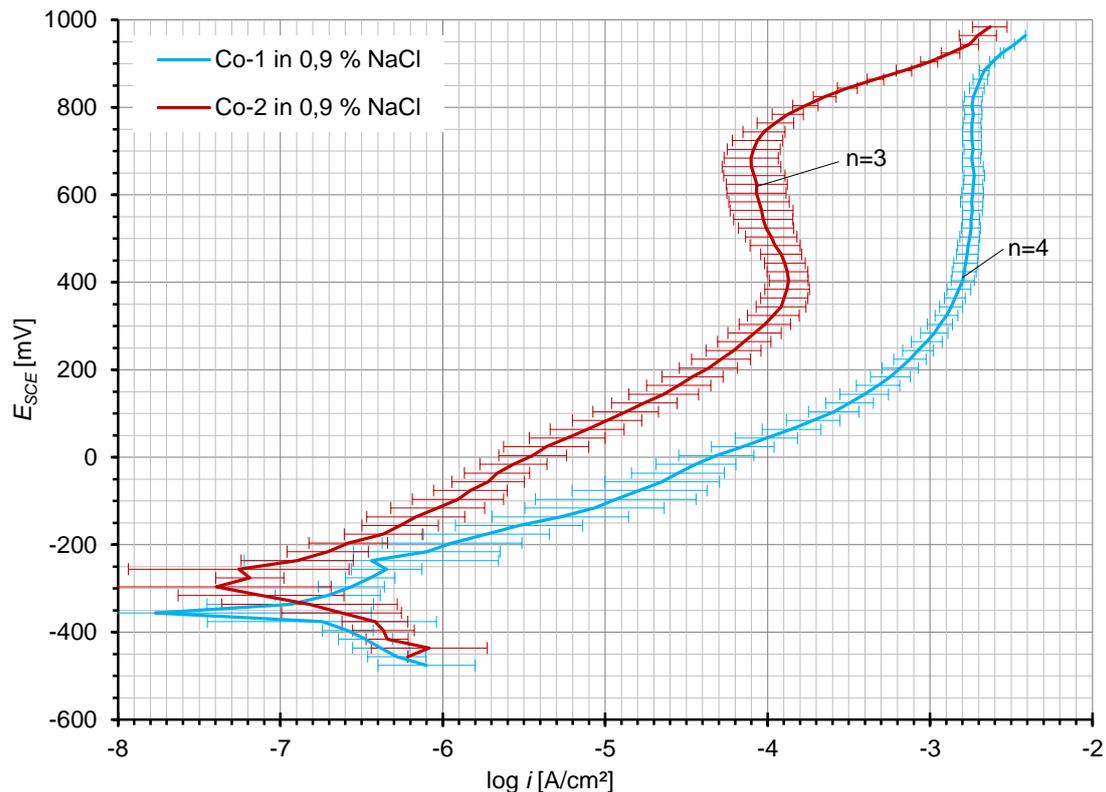


Abbildung 20. Vergleich der Mittelwerte der potentiodynamischen Messkurven der experimentellen Legierungen Co-1 und Co-2 in 0,9 % NaCl

Wie oben bereits geschildert, wird aus Abbildung 20 ersichtlich, dass die beiden Legierungen ein Durchbruchpotential (E_{p-2}) bei ca. 800 mV besitzen. Das Durchbruchpotential (E_{p-2}) von Legierung Co-2 liegt jedoch um über eine Zehnerpotenz niedriger, als das von Legierung Co-1. Legierung Co-2 weist im aktiven Bereich einen steileren Kurvenanstieg auf. Folglich ist der Passivierungsbereich von Legierung Co-1 kleiner.

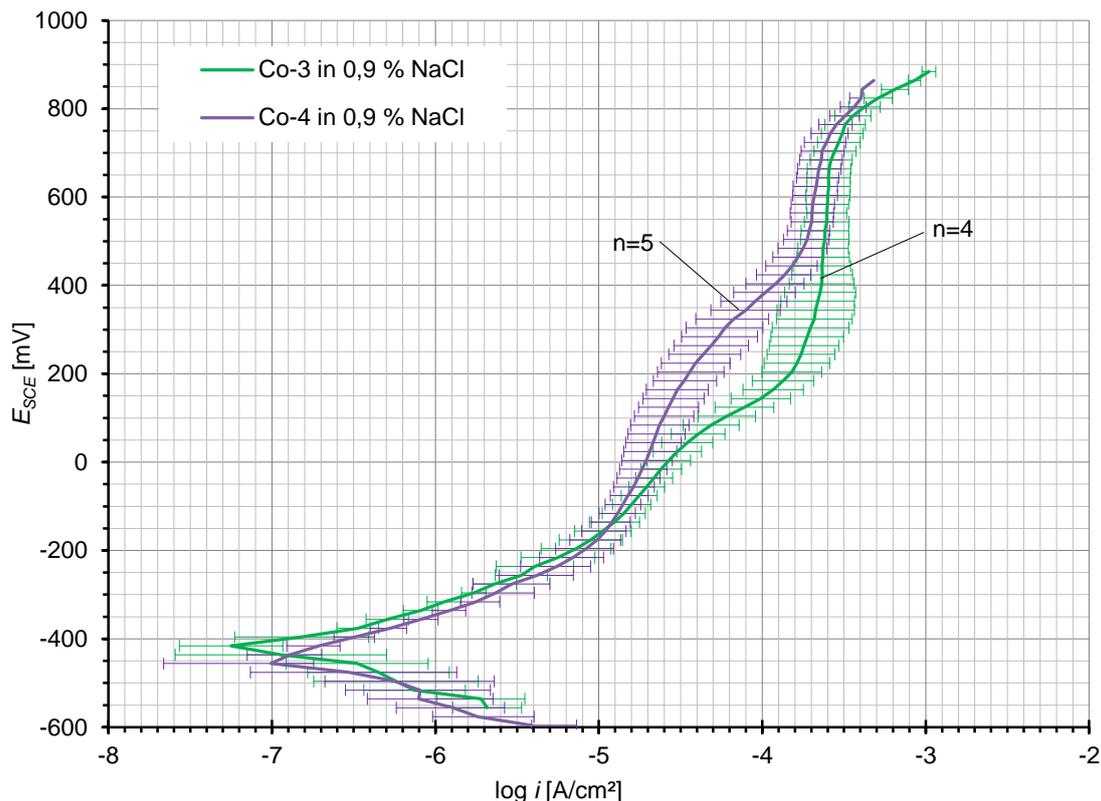


Abbildung 21: Vergleich der Mittelwerte der potentiodynamischen Messkurven der experimentellen Legierungen Co-3 und Co-4 in 0,9 % NaCl

Abbildung 21 zeigt, dass die beiden Legierungen zwei Durchbruchpotentiale (E_{p-1} und E_{p-2}) aufweisen. Auch sonst ähneln sich die Kurvenverläufe. So liegen die Gleichgewichtspotentiale der beiden Legierungen bei ca. -410 mV. Darüber hinaus sind die Kurvenverläufe bis zu einem Potential von 0 mV nahezu identisch. Danach variieren die Kurven allerdings. So besitzt Legierung Co-3 ihr erstes Durchbruchpotential (E_{p-1}) bei ca. 50 mV, während das der Legierung Co-4 erst bei ca. 250 mV zu finden ist. Das zweite Durchbruchpotential (E_{p-2}) findet sich für beide Legierungen bei einem Potentialwert von ca. 800 mV, bei ähnlich großen Stromdichtewerten. Durch die beiden Durchbruchpotentiale (E_{p-1} und E_{p-2}) weisen die Legierungen auch zwei Passivierungsbereiche auf. Dabei erstreckt sich bei Legierung Co-3 der erste Passivierungsbereich von -100 bis 50 mV und der zweite von ca. 250 bis 750 mV. Bei Legierung Co-4 erstreckt sich der erste Passivierungsbereich von ca. -50 bis 250 mV und der zweite von 500 bis 800 mV. Dabei liegen die ersten Passivierungsbereiche bei niedrigeren Stromdichtewerten, als die der zweiten Bereiche.

Potentiodynamische Messkurven im Elektrolyt 0,1 M NaCl-Milchsäure

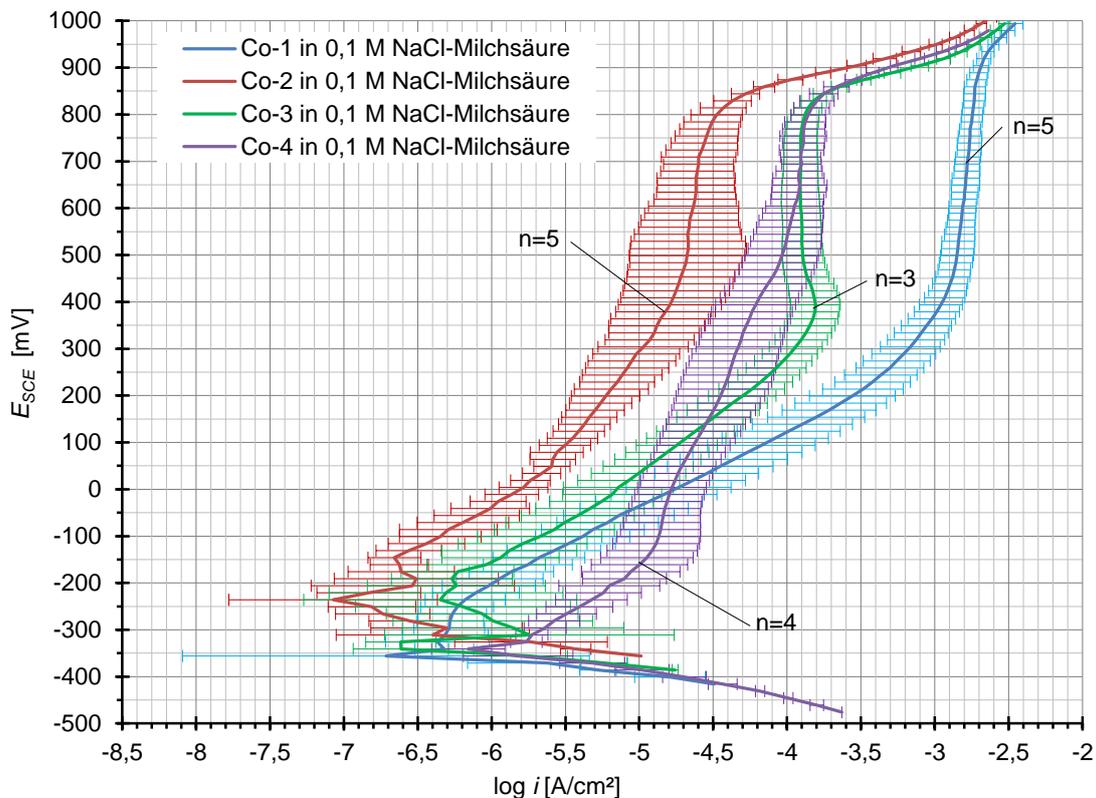


Abbildung 22: Vergleich der Mittelwerte der potentiodynamischen Messkurven der vier experimentellen Legierungen Co-1 bis Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Abbildung 22 zeigt die potentiodynamischen Messkurven der vier Legierungen. Dabei fällt auf, dass lediglich Legierung Co-4 zwei Durchbruchpotentiale (E_{p-1} und E_{p-2}) besitzt. Zwischen 800 bis 900 mV haben jedoch alle vier Legierungen ein Durchbruchpotential (E_{p-2}). Die Gleichgewichtspotentiale der Legierungen liegen im Bereich von -400 bis -200 mV. Weiterhin fällt auf, dass der Passivierungsbereich von Legierung Co-3 und der zweite Passivierungsbereich der Legierung Co-4 im gleichen Stromdichtebereich liegen.

4 Ergebnisse

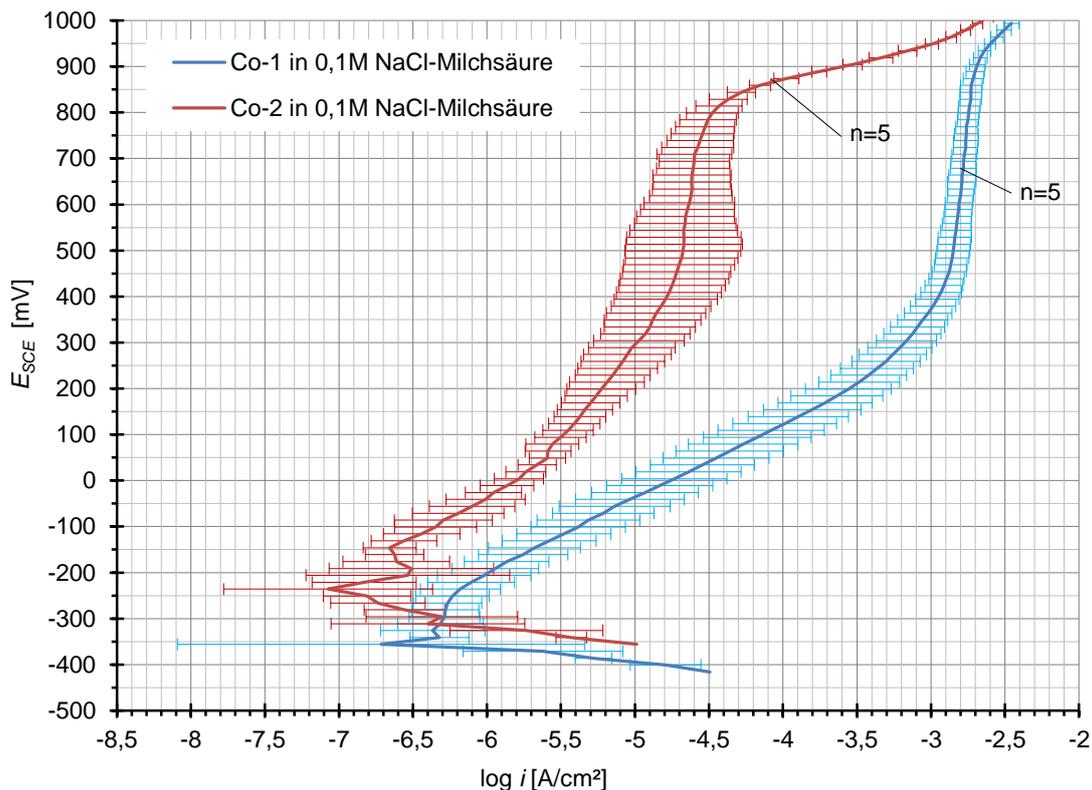


Abbildung 23: Vergleich der Mittelwerte der potentiodynamischen Messkurven der vier experimentellen Legierungen Co-1 und Co-2 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Aus Abbildung 23 wird ersichtlich, dass das Gleichgewichtspotential der Legierung Co-1 bei -350 mV und das von Legierung Co-2 bei -250 mV liegt. Bei Legierung Co-2 ist im aktiven Bereich ein steilerer Kurvenanstieg zu beobachten. Dies bedingt, zusammen mit dem niedrigeren Durchbruchpotentialwert, einen kleineren Passivierungsbereich, der allerdings bei einem wesentlich niedrigeren Stromdichtenniveau lokalisiert ist.

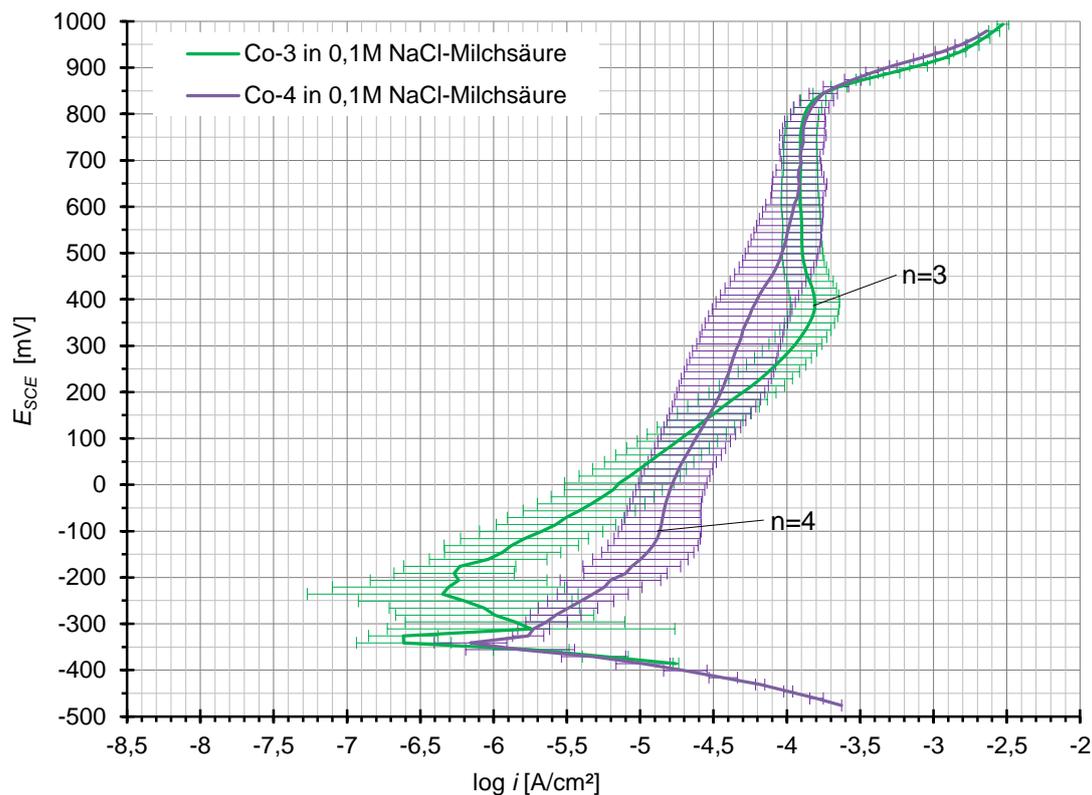


Abbildung 24: Vergleich der Mittelwerte potentiodynamischen Messkurven der experimentellen Legierungen Co-3 und Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Abbildung 24 zeigt, dass beide Legierungen bei -350 mV ihr Gleichgewichtspotential haben. Ebenfalls liegt das Durchbruchpotential (E_{p-2}) bei ca. 830 mV, wobei die Stromdichtewerte nahezu identisch sind. Die Legierung Co-3 hat einen Passivierungsbereich von ca. 400 bis 800 mV. Legierung Co-4 hat zwei Passivierungsbereiche, wobei der erste sich von ca. -100 bis 100 mV erstreckt und der zweite von ca. 600 bis 800 mV reicht. Dabei liegt der zweite Passivierungsbereich im selben Stromdichteniveau, wie der von Legierung Co-3. Der erste Passivierungsbereich von Legierung Co-4 liegt um den Faktor zehn in einem niedrigeren Stromdichteniveau.

4.1.1.3 Elektrolytvergleich

Während man in den Abschnitten 4.1.1.1 und 4.1.1.2 die einzelnen experimentellen Legierungen Co-1 bis Co-4 miteinander vergleichen kann, zeigen die Abbildung 25 bis Abbildung 32 welchen Einfluss die jeweiligen Elektrolyte auf die Parameter haben.

Einfluss des Elektrolyten auf E_{corr}

In Abbildung 25 wurde auf die Darstellung der Standardabweichung aufgrund von Überladung verzichtet. Sie kann allerdings der Abbildung 86 im Anhang entnommen werden.

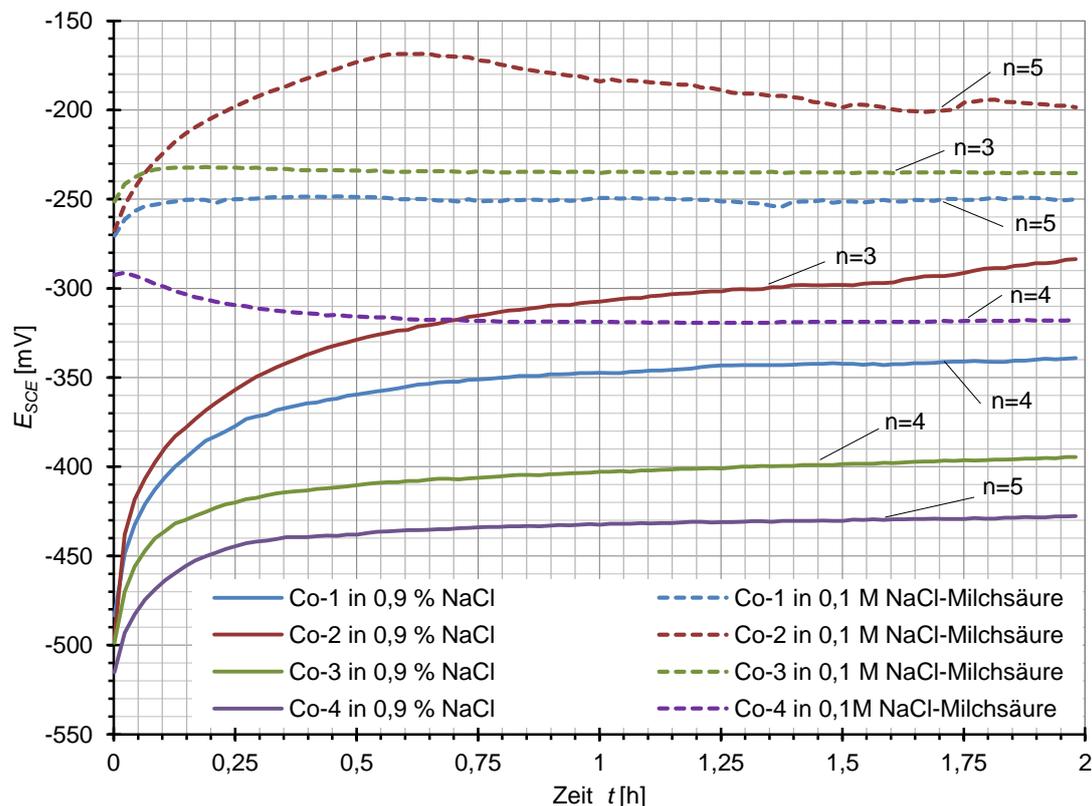


Abbildung 25: Vergleich E_{corr} -Messungen (Mittelwerte aller experimenteller Legierungen) in beiden Elektrolyten

In Abbildung 25 zeigt sich, dass bei allen vier Legierungen die Ruhepotentialwerte im Elektrolyt 0,9 % NaCl bei negativeren Potentialen lokalisiert sind, als im Elektrolyt 0,1 M NaCl-Milchsäure. Dabei ergeben sich die größten Niveauunterschiede bei den Legierungen Co-3 und Co-4. Darüber hinaus wird ersichtlich, dass sich die Kurvenverläufe in beiden Elektrolyten, bis auf die beiden Legierungen Co-2 und Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure, ähneln.

4 Ergebnisse

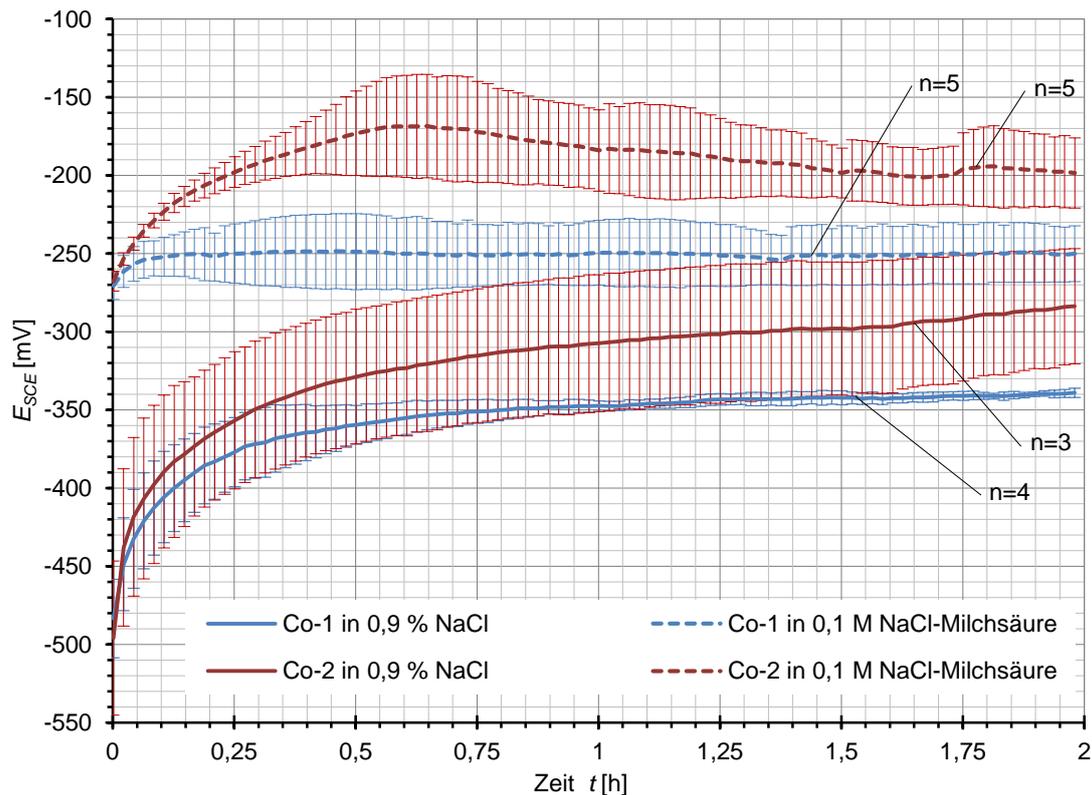


Abbildung 26: Vergleich E_{corr} -Messungen der Mittelwerte der experimentellen Legierungen Co-1 und Co-2 in beiden Elektrolyten

Abbildung 26 zeigt in Ergänzung zu Abbildung 25, dass die Ruhepotentiale zu Messbeginn zwischen den beiden Elektrolyten um ca. 230 mV differieren, während nach zwei Stunden die Differenz nur noch ca. 70 mV beträgt.

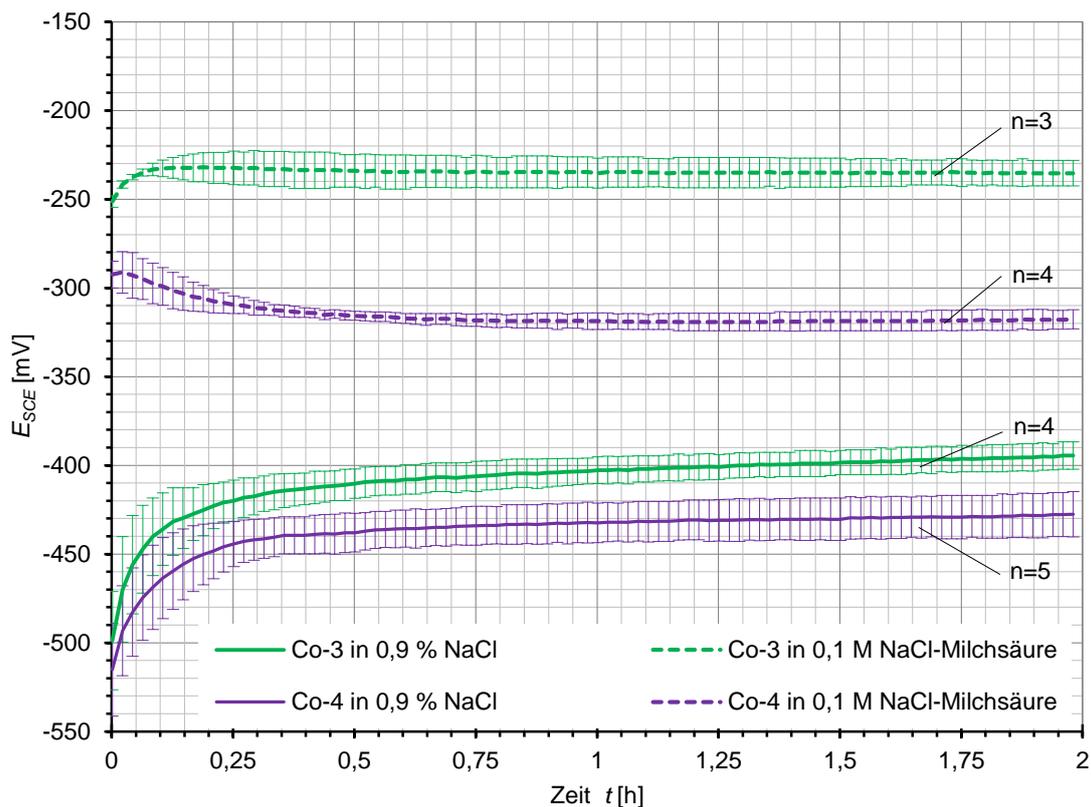


Abbildung 27: Vergleich E_{corr} -Messungen der Mittelwerte der experimentellen Legierungen Co-3 und Co-4 in beiden Elektrolyten

In Abbildung 27 zeigt sich, dass bei Legierung Co-3 zu Messbeginn die Differenz der Ruhepotentiale in den beiden Elektrolyten ca. 250 mV beträgt und sich nach zwei Stunden auf 200 mV reduziert. Bei Legierung Co-4 beträgt die Differenz der Ruhepotentiale in beiden Elektrolyten zu Beginn der Messung ca. 210 mV und reduziert sich nach zwei Stunden auf 100 mV.

Einfluss des Elektrolyten auf die Parameter der potentiodynamischen Messkurven

In Abbildung 28 wurde auf die Darstellung der Standardabweichung aufgrund von Überladung verzichtet. Sie kann allerdings der Abbildung 87 im Anhang entnommen werden.

4 Ergebnisse

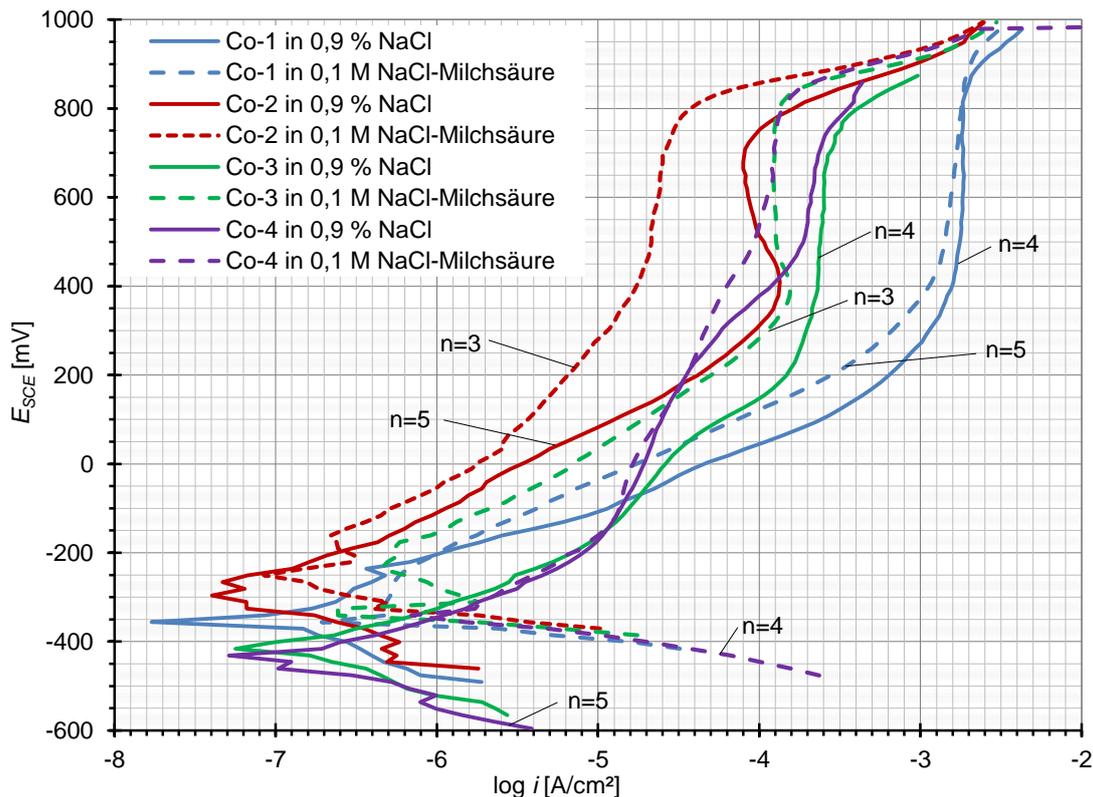


Abbildung 28: Vergleich der potentiodynamischen Messkurven in beiden Elektrolyten

Abbildung 28 macht deutlich, dass die potentiodynamischen Messkurven im Elektrolyt 0,1 M NaCl-Milchsäure für alle vier Legierungen in einem höheren Potentialbereich und in einem niedrigeren Stromdichteniveau lokalisiert sind. Weiterhin fällt auf, dass in 0,1 M NaCl-Milchsäure im aktiven Bereich ein steilerer Kurvenanstieg vorliegt und dadurch die Passivierungsbereiche kleiner werden.

4 Ergebnisse

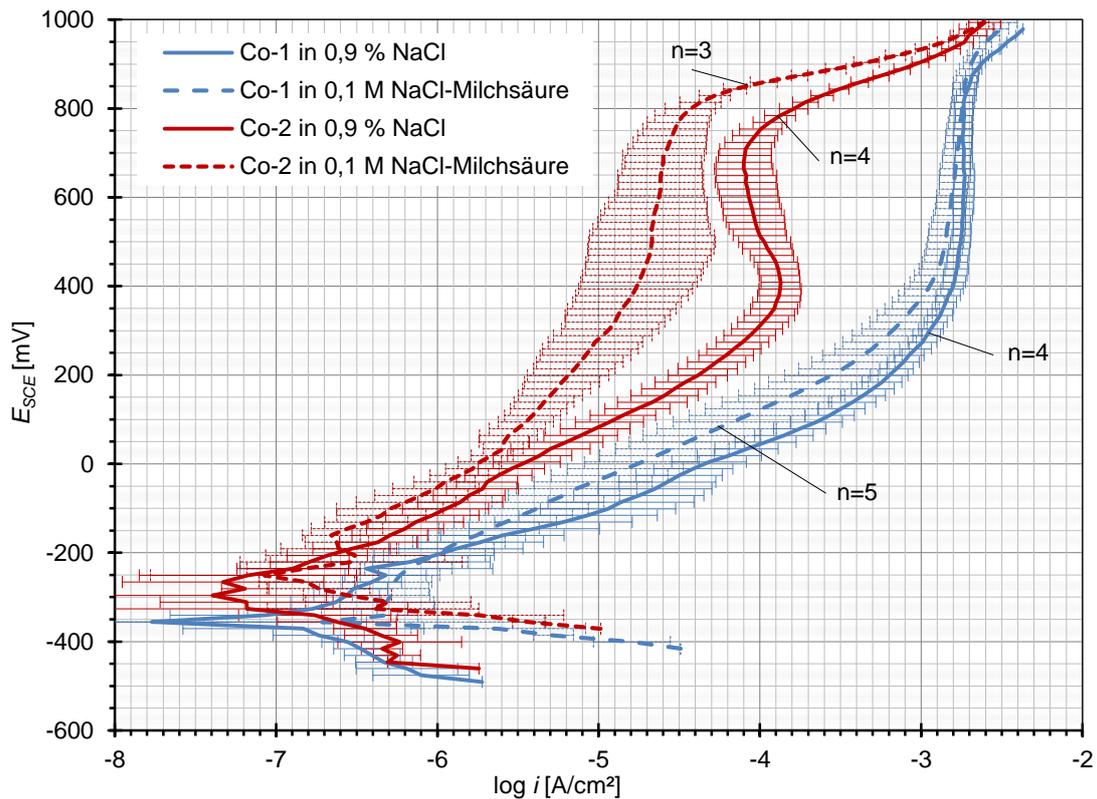


Abbildung 29: Vergleich der Mittelwerte der potentiodynamischen Messkurven der experimentellen Legierungen Co-1 und Co-2 in beiden Elektrolyten

Ergänzend zu Abbildung 28 zeigt Abbildung 29, dass im Elektrolyt 0,1 M NaCl-Milchsäure die Standardabweichungen größer sind und die Kurven im Bereich der Durchbruchpotentiale „sanfter“ verlaufen.

4 Ergebnisse

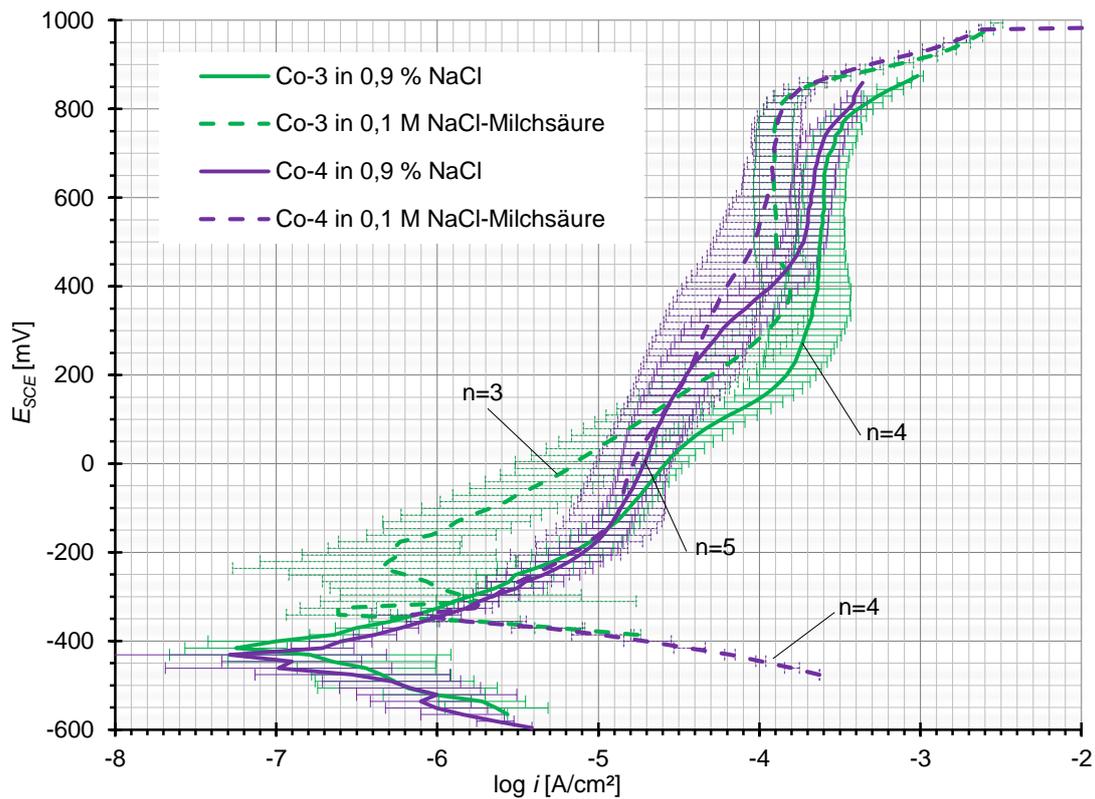


Abbildung 30: Vergleich der Mittelwerte der potentiodynamischen Messkurven der experimentellen Legierungen Co-3 und Co-4 in beiden Elektrolyten

Abbildung 30 zeigt den Kurvenverlauf der Legierungen Co-3 und Co-4 in beiden Elektrolyten. Zur besseren Übersicht werden die Legierungen Co-3 und Co-4 nachfolgend noch in separaten Abbildungen dargestellt.

4 Ergebnisse

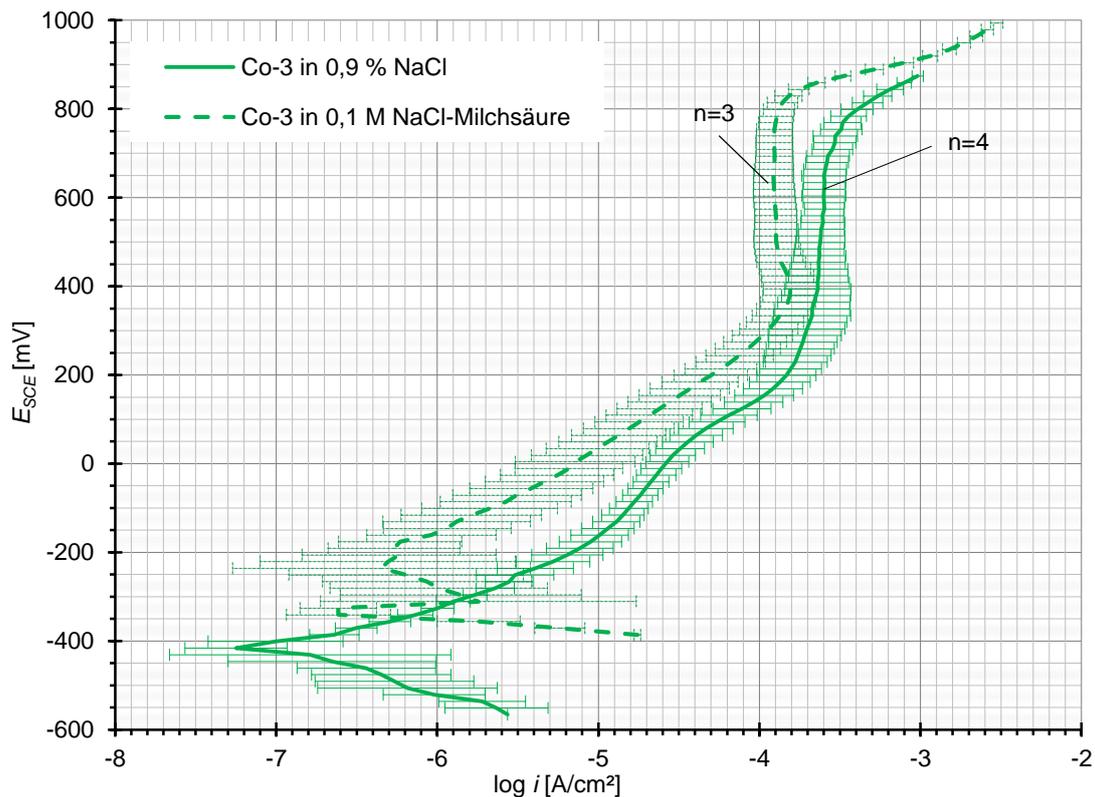


Abbildung 31: Vergleich der Mittelwerte der potentiodynamischen Messkurven der experimentellen Legierungen Co-3 in beiden Elektrolyten.

Ergänzend zum bereits Geschilderten, fällt in Abbildung 31 auf, dass die Legierung Co-3 in 0,9 % NaCl zwei Durchbruchpotentiale (E_p-1 und E_p-2) aufweist, während dieselbe Legierung in 0,1 M NaCl-Milchsäure nur ein Durchbruchpotential (E_p-2) besitzt.

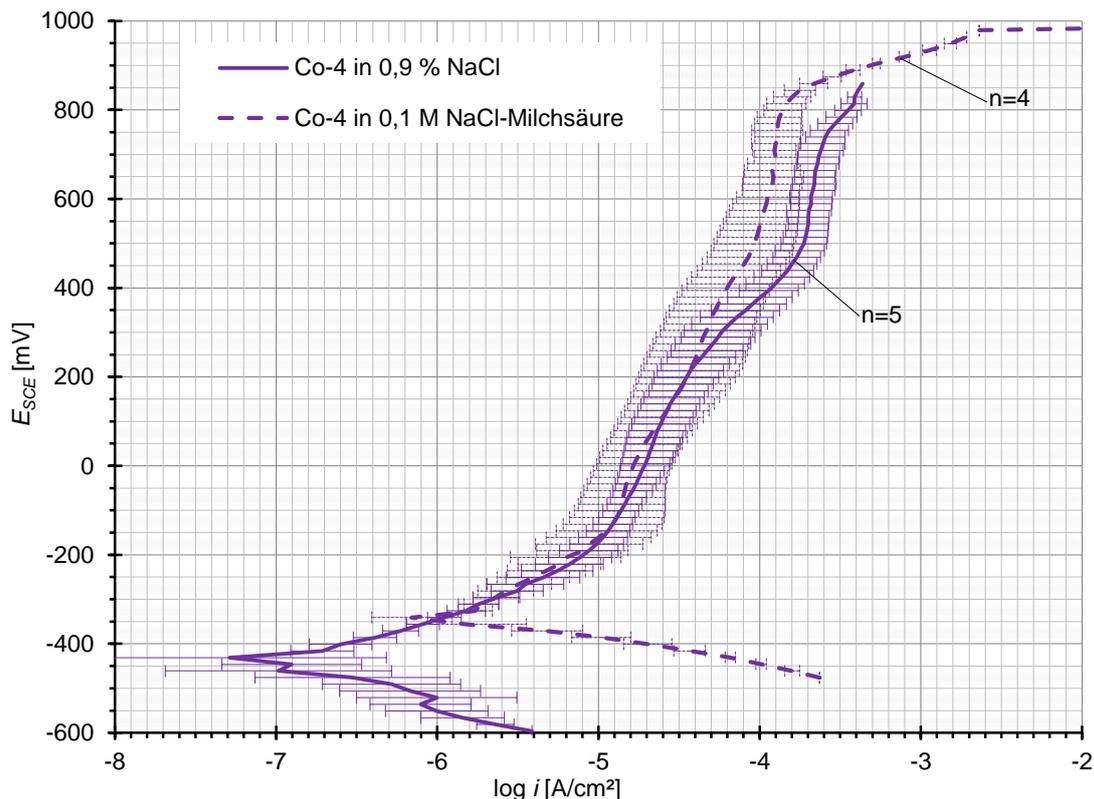


Abbildung 32: Vergleich der Mittelwerte der potentiodynamischen Messkurven der experimentellen Legierungen Co-4 in beiden Elektrolyten.

In Abbildung 32 fällt auf, dass die Standardabweichung im Elektrolyt 0,1 M NaCl-Milchsäure geringfügig größer ist. Außerdem ist im Elektrolyt 0,1 M NaCl-Milchsäure der Passivierungsbereich etwas besser ausgeprägt, da der Anstieg der Stromdichtwerte geringer ausfällt. Weiterhin ist ersichtlich, dass die Legierung in beiden Elektrolyten jeweils zwei Durchbruchpotentiale (E_p-1 und E_p-2) aufweist.

4.1.2 Auswertung der Elektrochemischen Korrosionsmessungen

4.1.2.1 Auswertung der Messkurven

Als Auswertkriterien dienen, in Anlehnung an DIN EN ISO 10271:2011 [47], von jeder Messung die in Abschnitt 3.2.1.3 beschriebenen Parameter.

Die Tabelle 4 und Tabelle 5 zeigen diese für die jeweiligen Legierungen in den Elektrolyten 0,9 % NaCl und 0,1 M NaCl-Milchsäure. Allerdings handelt es sich bei diesen Parametern lediglich um die Mittelwerte der einzelnen Legierungen.

4 Ergebnisse

In Abschnitt 4.1.1 wurde bereits erwähnt, dass einige Prüfkörper nicht zur Erstellung der Messkurven herangezogen wurden, da sie zu sehr von der Norm abwichen. Die entsprechenden fehlerhaften Prüfkörper wurden daher auch nicht in die Berechnung der einzelnen Parameter einbezogen. Ihre Parameter können jedoch der Tabelle 11 bis Tabelle 18 im Anhang entnommen werden.

Wie in Abschnitt 3.2.1.3 bereits erwähnt, wurde auf die Berechnung des Polarisationswiderstandes verzichtet, da er nicht Gegenstand der Auswertung war.

In den Abbildung 33 bis Abbildung 42 werden diese Parameter nochmals graphisch dargestellt.

Tabelle 4: Parameterauswertung der potentiodynamischen Messkurven in Anlehnung an DIN EN ISO 10271:2011 [47] im Elektrolyten 0,9 % NaCl

Parameter	Co-1 (n=4)	Co-2 (n=3)	Co-3 (n=4)	Co-4 (n=5)
E_{corr} nach 2 h [mV]	-339,0±2,5	-283,3±36,7	-400,0±15,7	-427,8±12,4
$E(-6)$ [mV]	-215,3±18,4	-90,8±58,4	-313,1±29,4	-332,8±12,2
$E(-5)$ [mV]	-117,1±9,7	110,2±52,0	-126,9±62,9	-99,1±96,7
E_z [mV]	-350,0±2,7	-294,2±38,2	-418,5±13,9	-443,1±17,6
E_{p-1} [mV]	-	-	55,0±23,0	248,4±38,6
E_{p-2} [mV]	862,5±18,7	760,9±21,5	782,3±12,9	853,9±25,6
i_{p-1} [μ A/cm ²]	-	-	36,4±10,8	37,2±16,4
i_{p-2} [μ A/cm ²]	1892,0±254,4	62,0±26,5-	274,4±43,4	295,8±112,2
i_{corr} [nA/cm ²]	96,4±68,3	78,5±26,7	148,1±18,7	241,0±72,6
$i(300\text{ mV})$ [μ A/cm ²]	1190,4±199,4	82,4±33,1	199,2±34,1	64,4±29,9
$i(300\text{ mV}+E_z)$ [μ A/cm ²]	33,9±3,9	3,6±1,9	15,2±6,8	12,2±2,8
$i(500\text{ mV})$ [μ A/cm ²]	1795,8±277,7	92,0±33,5	242,9±42,6	195,5±65,7
Ba	113,4±15,2	168,1±8,9	160,1±12,1	153,5±30,2
Bc	123,7±10,6	132,3±24,1	46,3±3,6	83,1±48,8
R_p [kOhm/cm ²]	43,7±20,5	730,1±180,9	161,1±29,4	160,2±49,7

4 Ergebnisse

Tabelle 5: Parameterauswertung der potentiodynamischen Messkurven in Anlehnung an DIN EN ISO 10271:2011 [47] im Elektrolyten 0,1 M NaCl-Milchsäure

Parameter	Co-1 (n=5)	Co-2 (n=5)	Co-3 (n=3)	Co-4 (n=4)
E_{corr} nach 2 h [mV]	-249,6±17,9	-198,8±22,2	-235,0±6,9	-317,7±5,4
$E(-6)$ [mV]	-184,5±49,2	-40,8±43,4	-158,8±23,5	-335,0±3,1
$E(-5)$ [mV]	-19,7±56,3	325,4±162,1	59,8±46,5	-166,7±28,1
E_z [mV]	-349,2±15,2	-272,1±66,1	-337,3±6,6	-347,1±3,0
E_{p-1} [mV]	-	-	-	138,8±210,0
E_{p-2} [mV]	914,7±11,7	813,5±22,0-	830,1±3,3	853,4±8,1
i_{p-1} [μ A/cm ²]	-	-	-	26,9±8,6
i_{p-2} [μ A/cm ²]	1955,1±358,0	29,4±14,5-	109,7±18,8	156,8±28,1
i_{corr} [nA/cm ²]	334,8±191,0	238,4±275,5	300,8±31,2	2203,8±380,0
$i(300\text{ mV})$ [μ A/cm ²]	724,4±308,0	13,6±8,4	116,2±41,2	63,0±22,4
$i(300\text{ mV}+E_z)$ [μ A/cm ²]	9,7±6,3	3,0±2,7	5,5±1,5	19,0±3,6
$i(500\text{ mV})$ [μ A/cm ²]	1453,3±358,0	49,9±18,6	115,3±30,5	119,4±24,8
Ba	267,5±66,0	359,4±155,4	307,8±56,3	264,3±19,6
Bc	24,6±2,9	33,9±17,4	25,4±1,6	58,1±3,8
R_p [kOhm/cm ²]	18,5±8,4	86,6±83,2	20,5±3,6	9,0±0,4

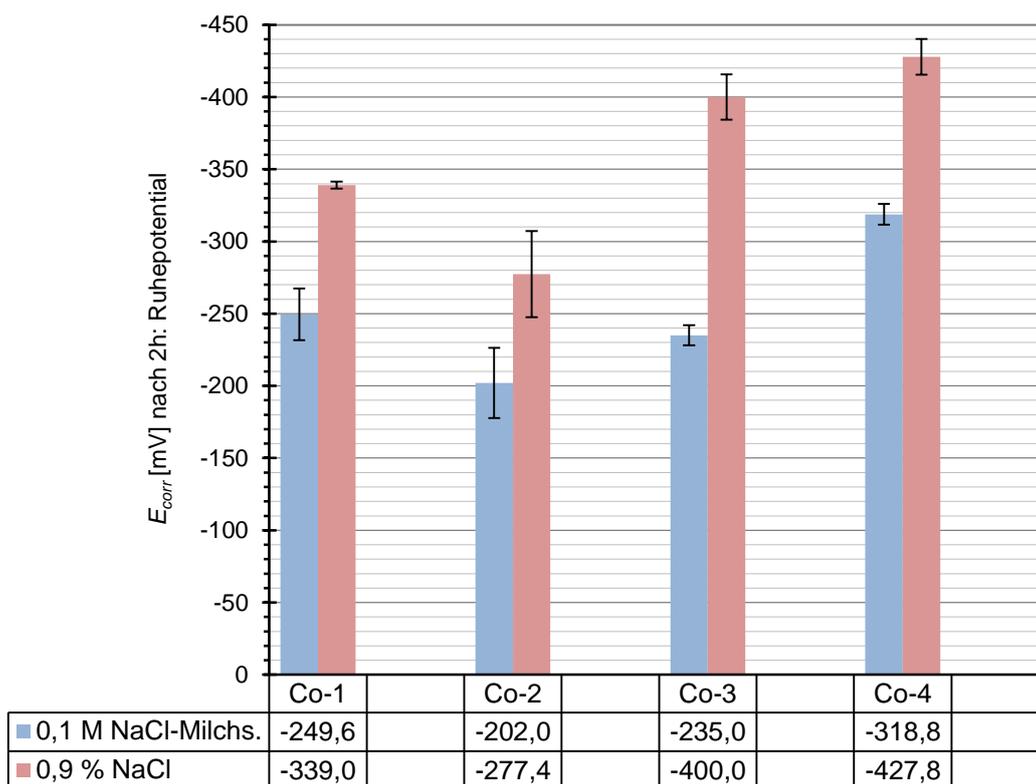


Abbildung 33: Ruhepotentialwerte (E_{corr} nach 2h) in mV der vier experimentellen Legierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte

Wie bereits in der Auswertung der potentiodynamischen Messkurven geschildert, verdeutlicht das Säulendiagramm in Abbildung 33 nochmals, dass für alle vier Legierungen die Ruhepotentiale im Elektrolyten 0,1 M NaCl-Milchsäure positivere Werte haben. Auffallend ist auch, dass die Legierungen Co-1 und Co-2, trotz niedrigeren PRE-Werten, in beiden Elektrolyten die positiveren E_{corr} -Werte haben. Weiterhin fällt auf, dass die Differenz zwischen dem E_{corr} -Wert in 0,9 % NaCl und 0,1 M NaCl-Milchsäure bei den beiden Legierungen Co-1 und Co-2 am geringsten ist. Dies sind auch die Legierungen mit dem höchsten Chromgehalt.

4 Ergebnisse

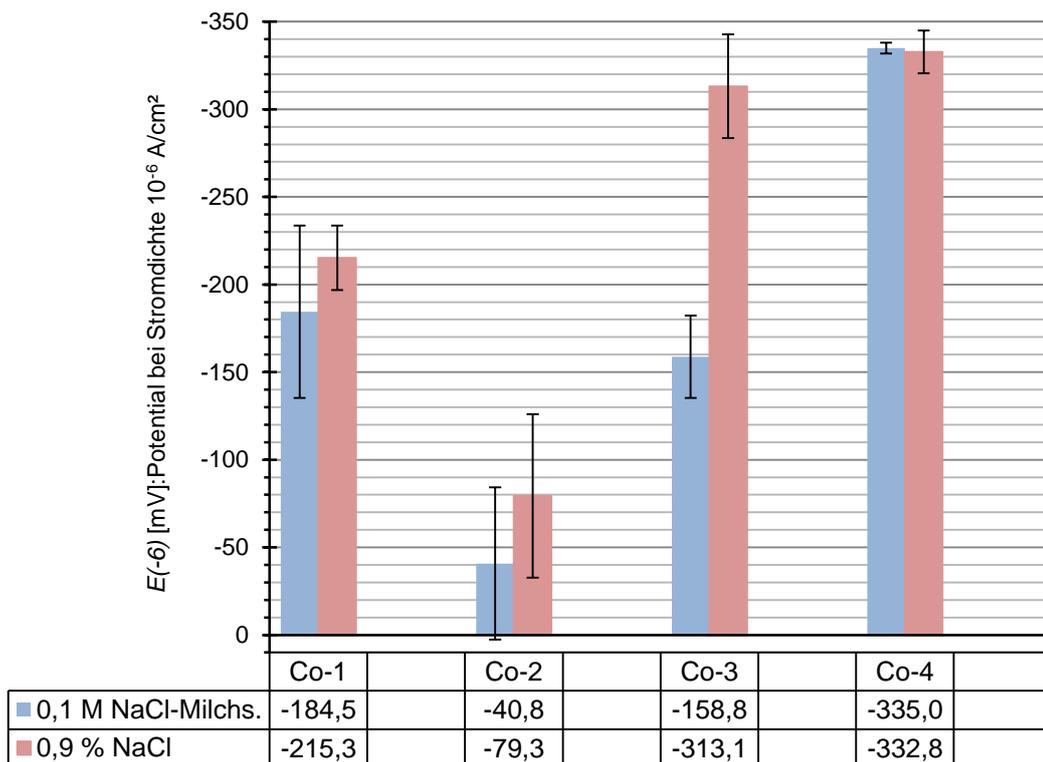


Abbildung 34: Potentialwerte bei Stromdichte 10^{-6} mA/cm^2 der vier experimentellen Legierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte

Beim Vergleich der $E(-6)$ -Werte zeigt sich in Abbildung 34, dass die Legierungen Co-1 bis Co-3 im Elektrolyten 0,1 M NaCl-Milchsäure weiterhin positivere Werte haben, als im Elektrolyt 0,9 % NaCl. Lediglich die Legierung Co-4 hat in beiden Elektrolyten annähernd gleiche Werte.

4 Ergebnisse

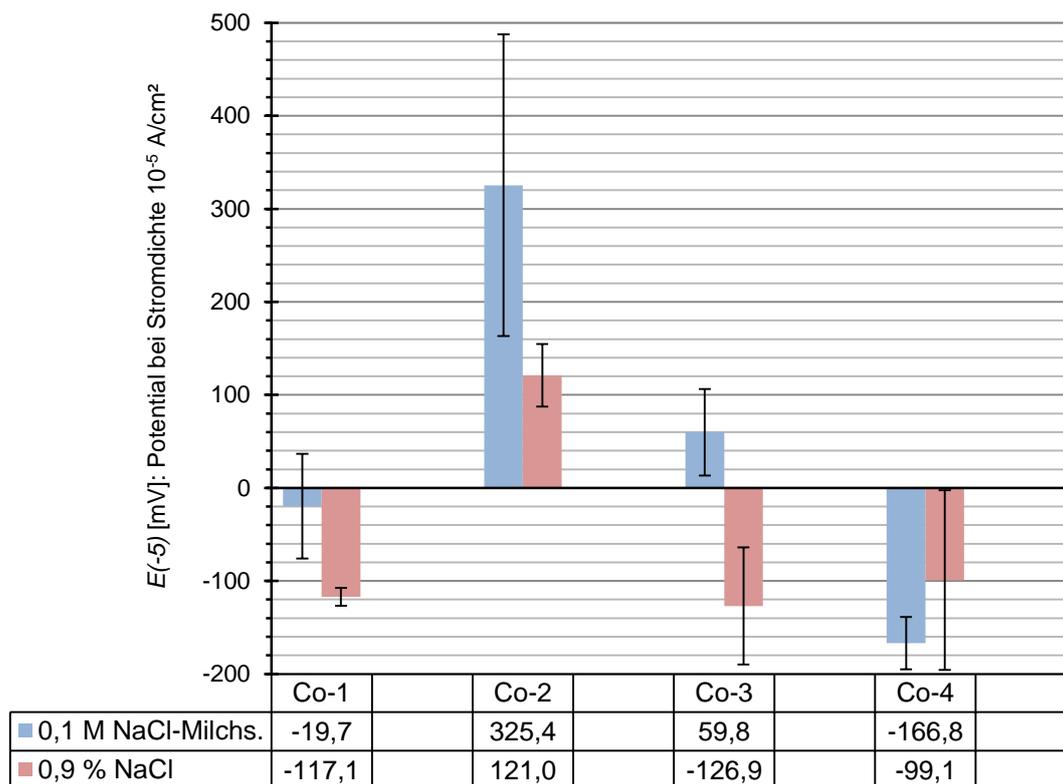


Abbildung 35: Potentialwerte bei Stromdichte 10^{-5} mA/cm^2 der vier experimentellen Legierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte

Beim Vergleich der $E(-5)$ -Werte zeigt Abbildung 35, dass alle vier Legierungen im Elektrolyten 0,1 M NaCl-Milchsäure positivere Werte haben.

4 Ergebnisse

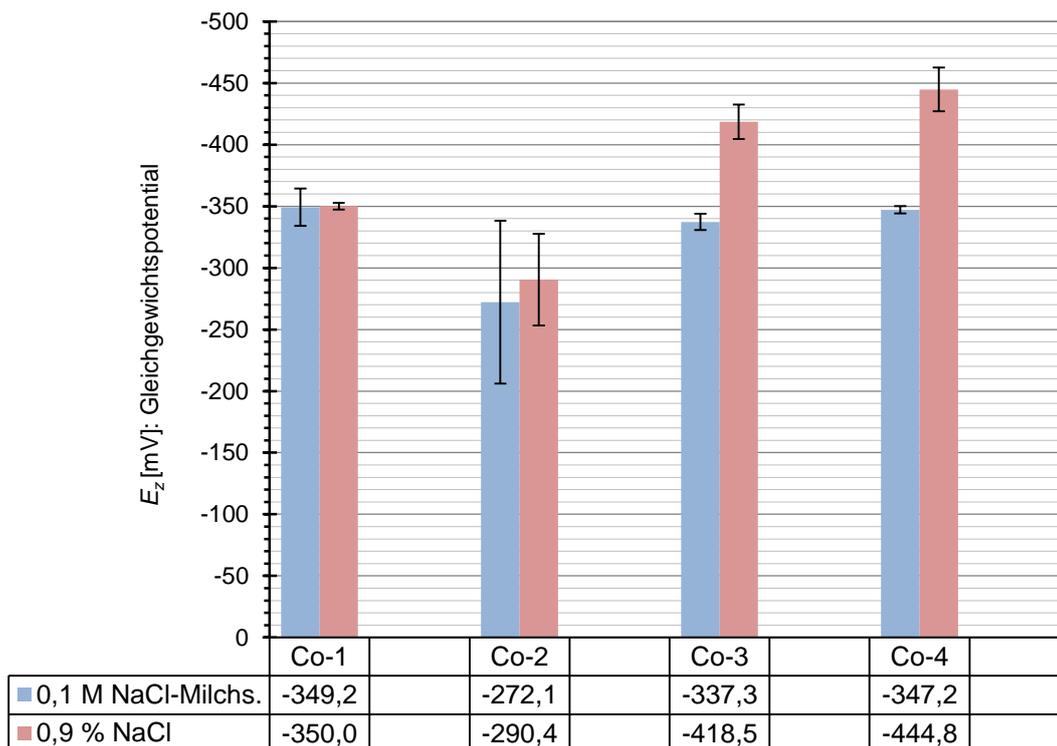


Abbildung 36: Gleichgewichtspotentialwerte (E_z) in mV der vier experimentellen Legierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte

In Abbildung 36 fällt auf, dass die E_z -Werte bei Legierung Co-1 in beiden Elektrolyten gleich groß sind. Bei den restlichen drei Legierungen sind die E_z -Werte in 0,1 M NaCl-Milchsäure positiver. Die Legierungen Co-3 und Co-4, die den gleichen PRE-Wert haben, haben nahezu identische E_z -Werte in beiden Elektrolyten.

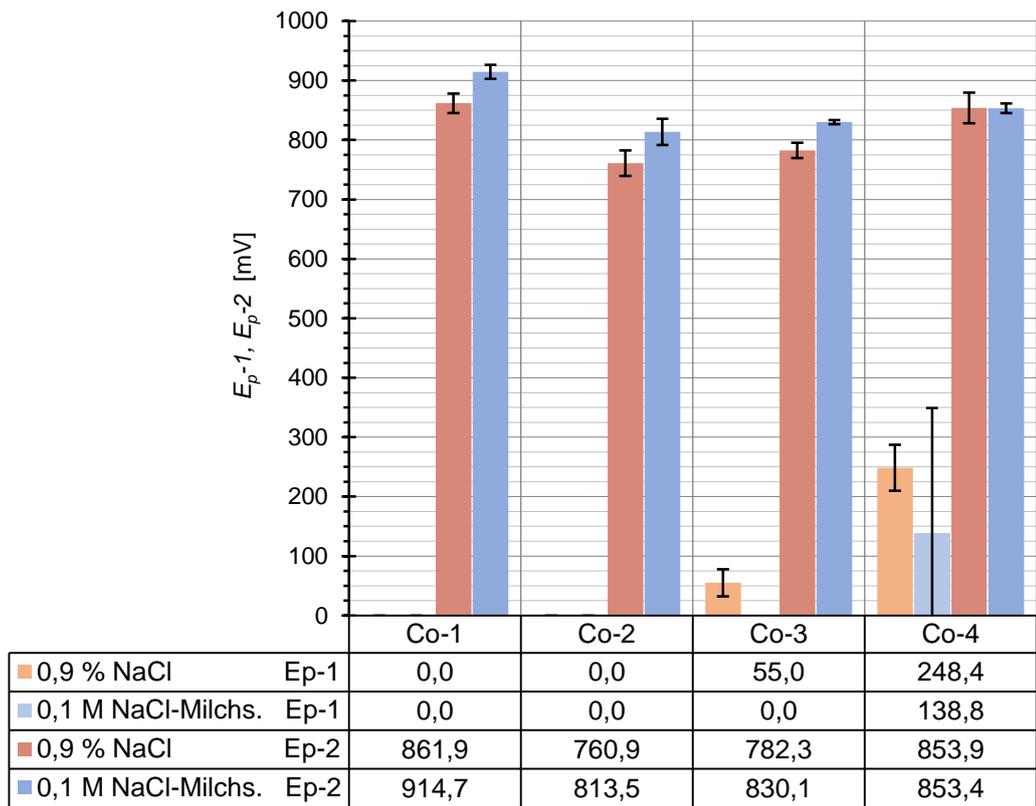


Abbildung 37: Durchbruchpotentialwerte (E_{p-1}) und (E_{p-2}) in mV der vier experimentellen Legierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte

Abbildung 37 zeigt, dass bei allen vier Legierungen in beiden Elektrolyten die Durchbruchpotentiale (E_{p-2}) in einem ähnlichen Potentialbereich, nämlich zwischen 760 und 914 mV, liegen. Ein weiteres Durchbruchpotential (E_{p-1}) hat die Legierung Co-3 im Elektrolyt 0,9 % NaCl und die Legierung Co-4 in beiden Elektrolyten. Diese Durchbruchpotentiale (E_{p-1}) sind einem wesentlich niedrigeren Potentialbereich lokalisiert.

4 Ergebnisse

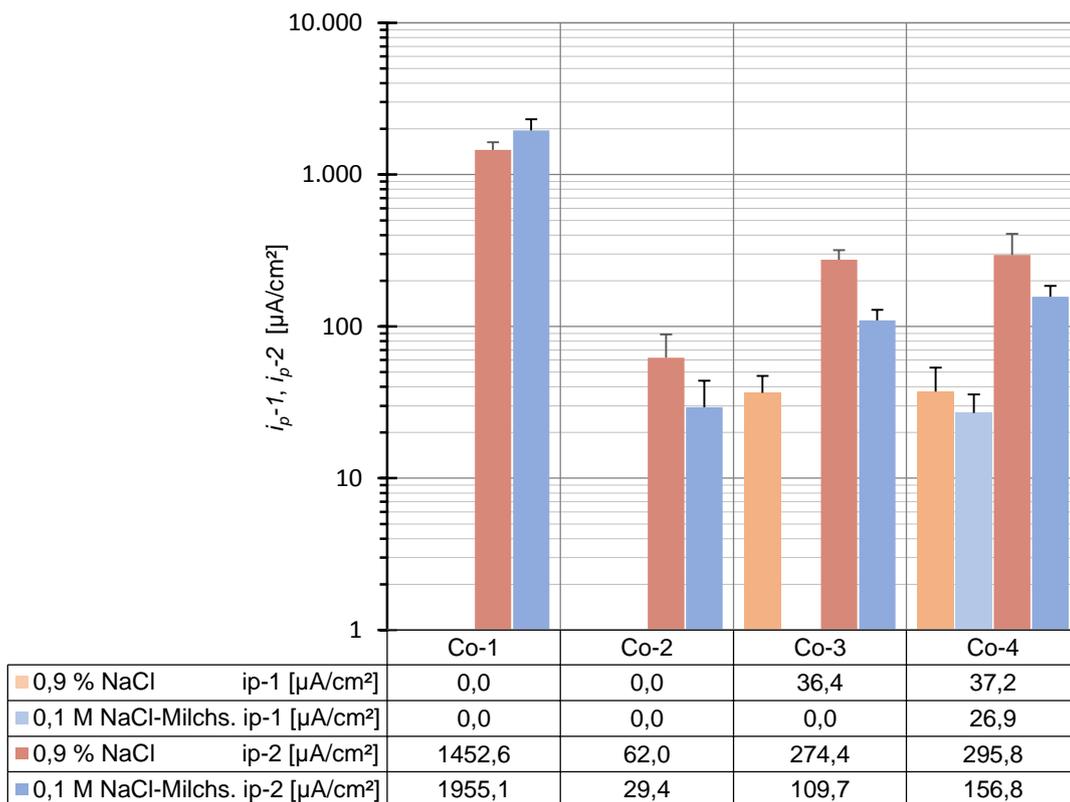


Abbildung 38: Stromdichte (i_p-1) und (i_p-2) in $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ beim Durchbruchpotential (E_p-1 und E_p-2) der vier experimentellen Legierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte

Aus Abbildung 38 wird ersichtlich, dass bei den Legierungen Co-2, Co-3 und Co-4 die Korrosionsstromdichten (i_p-2) bei den Durchbruchpotentialen (E_p-2) in 0,9 % NaCl höher sind, als in 0,1 M NaCl-Milchsäure. Nur bei Co-1 ist es geringfügig umgekehrt, jedoch bei wesentlich höheren Stromdichtewerten. Die i_p-2 -Werte der Legierungen Co-3 und Co-4 liegen in beiden Elektrolyten am nächsten beieinander.

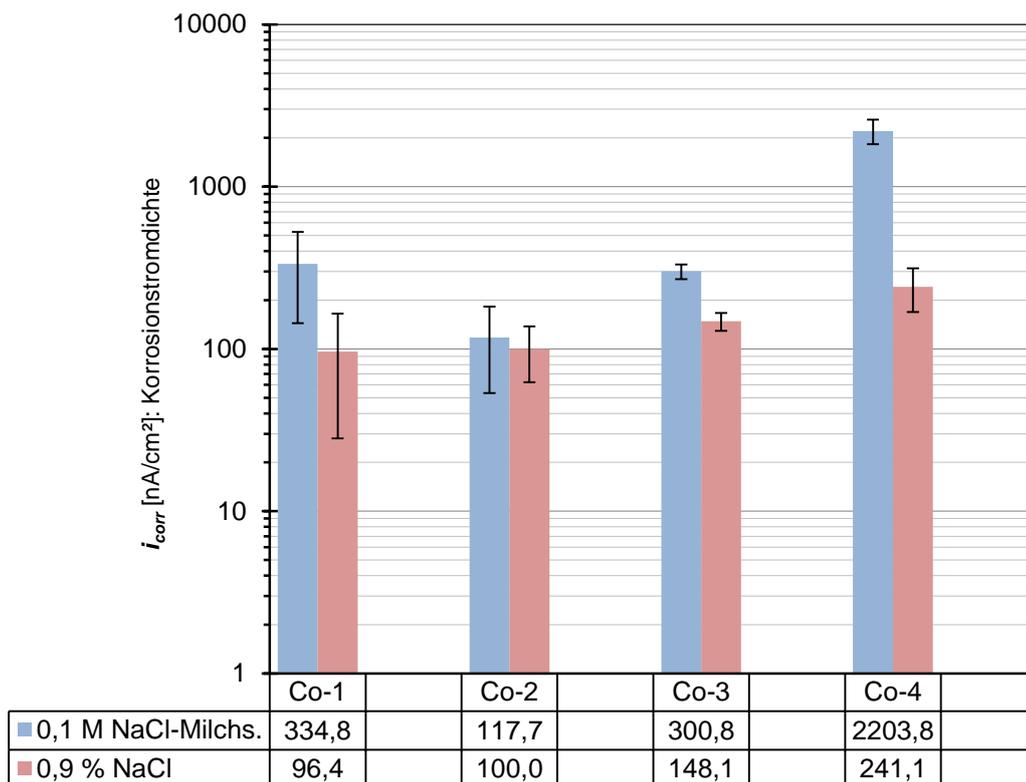


Abbildung 39: Korrosionsstromdichte (i_{corr}) in mA/cm² der vier experimentellen Legierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte

In Abbildung 39 fällt auf, dass die Legierung Co-2 im Vergleich zu den restlichen drei Legierungen in beiden Elektrolyten die kleinsten und in etwa identischen i_{corr} -Werte hat, wobei der i_{corr} -Wert in 0,1 M NaCl-Milchsäure minimal höher liegt. Auch die übrigen Legierungen haben im Elektrolyten 0,1 M NaCl-Milchsäure die höheren i_{corr} -Werte. Die höchsten i_{corr} -Werte weist die Legierung Co-4 auf.

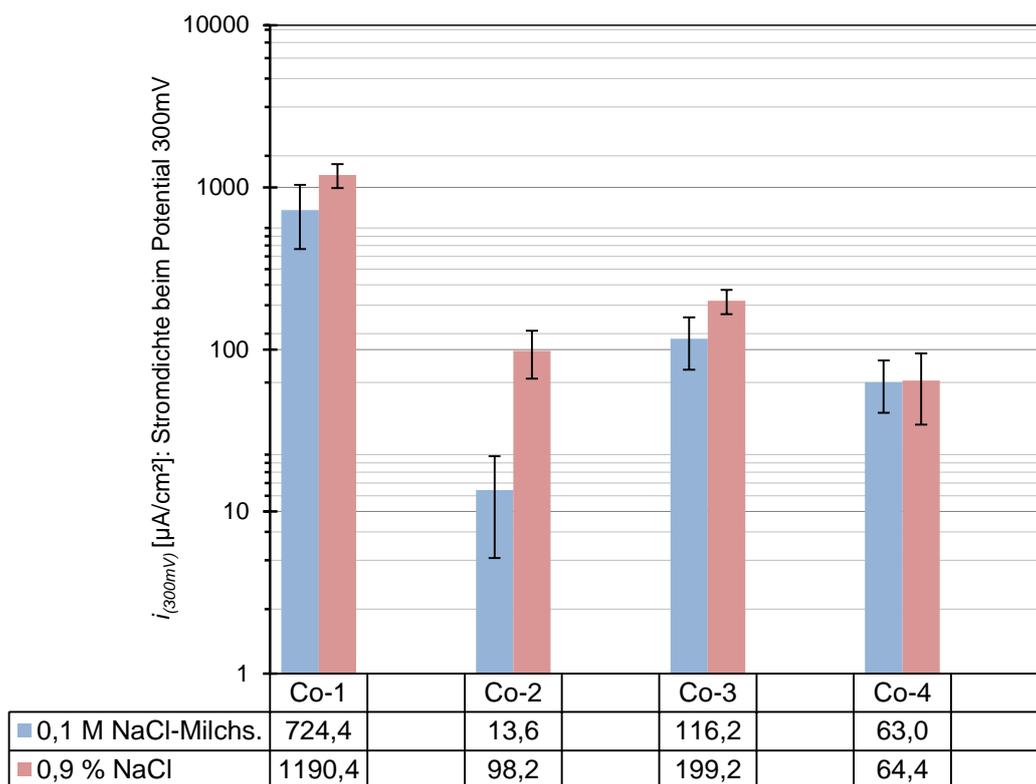


Abbildung 40: Stromdichte $i_{(300\text{ mV})}$ in $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ beim Potential 300 mV der vier experimentellen Legierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte

Abbildung 40 zeigt, dass sich wiederum die kleineren $i_{(300\text{ mV})}$ -Werte im Elektrolyten 0,1 M NaCl-Milchsäure finden, wobei allerdings bei Legierung Co-4 die $i_{(300\text{ mV})}$ -Werte in beiden Elektrolyten nahezu identisch sind. Die mit Abstand höchsten $i_{(300\text{ mV})}$ -Werte in beiden Elektrolyten hat die Legierung Co-1.

4 Ergebnisse

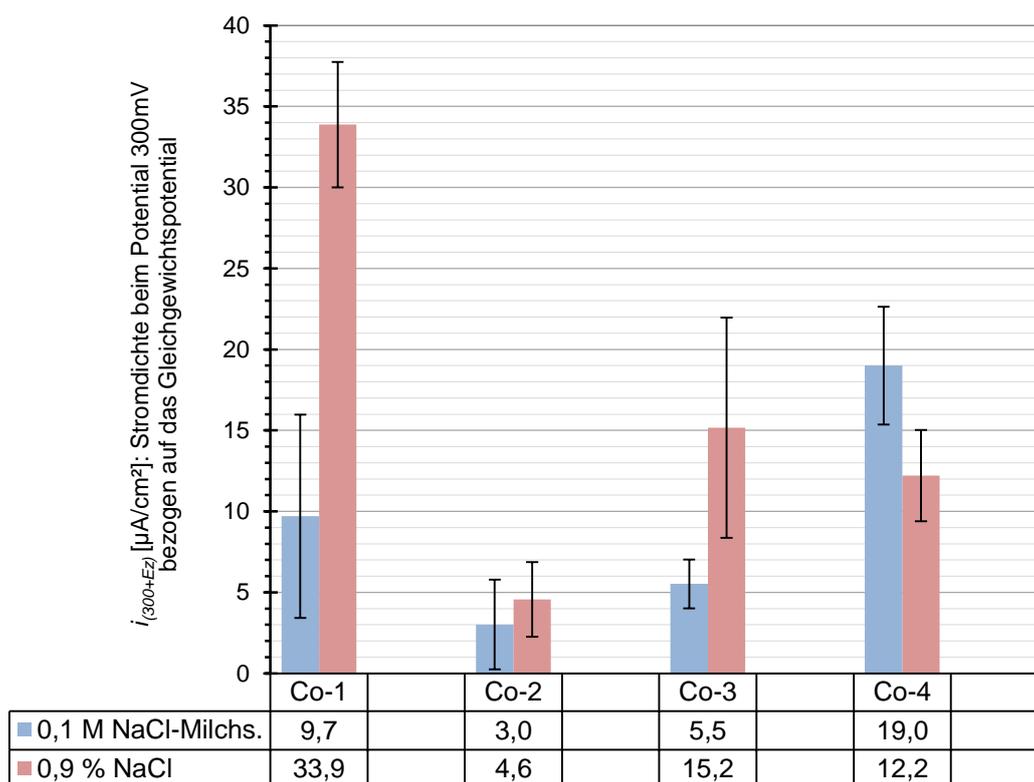


Abbildung 41: Stromdichte $i_{(300\text{ mV}+Ez)}$ in $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ beim Potential 300 mV bezogen auf das Gleichgewichtspotential der vier experimentellen Legierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte

Aus Abbildung 41 wird ersichtlich, dass die $i_{(300\text{ mV}+Ez)}$ -Werte der Legierungen Co-1 bis Co-3 im Elektrolyten 0,1 M NaCl-Milchsäure kleiner sind. Lediglich bei Legierung Co-4 sind die Verhältnisse umgekehrt. Die kleinsten Werte in beiden Elektrolyten liegen bei Legierung Co-2 vor. Den mit Abstand höchsten $i_{(300\text{ mV}+Ez)}$ hat die Legierung Co-1 im Elektrolyt 0,9 % NaCl.

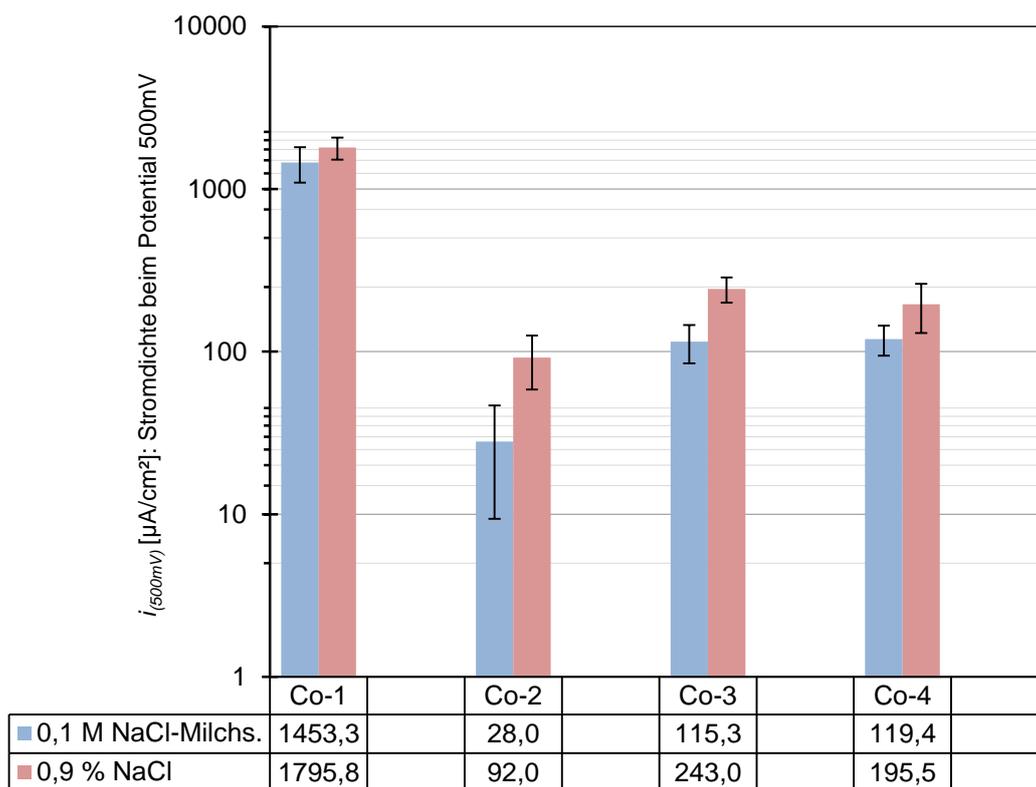


Abbildung 42: Stromdichte $i_{(500\text{ mV})}$ in $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ beim Potential 500 mV der vier experimentellen Legierungen unter Anwendung unterschiedlicher Elektrolyte

Abbildung 42 zeigt, dass im Elektrolyt 0,1 M NaCl-Milchsäure die $i_{(500\text{ mV})}$ -Werte kleiner sind, als in 0,9 % NaCl. Die jeweils kleinsten Werte in beiden Elektrolyten weist die Legierung Co-2 auf. Die Legierungen Co-3 und Co-4 sind bezüglich der $i_{(500\text{ mV})}$ -Werte annähernd identisch.

4.1.2.2 Analytische Auswertung der Elektrolytlösung

Aus der Abbildung 43 bis Abbildung 47 wird ersichtlich, welche Elemente im Mittel nach der Durchführung des elektrochemischen Tests in Lösung gegangen sind. Dabei können die Ergebnisse der einzelnen Prüfkörper der Tabelle 19 bis Tabelle 22 im Anhang entnommen werden. Wie aus dieser Tabelle ersichtlich ist, wurden Proben, deren Werte um mehr als Faktor zehn abwichen, für die Ergebnisfindung nicht berücksichtigt. In der Tabelle sind diese Werte rot gekennzeichnet.

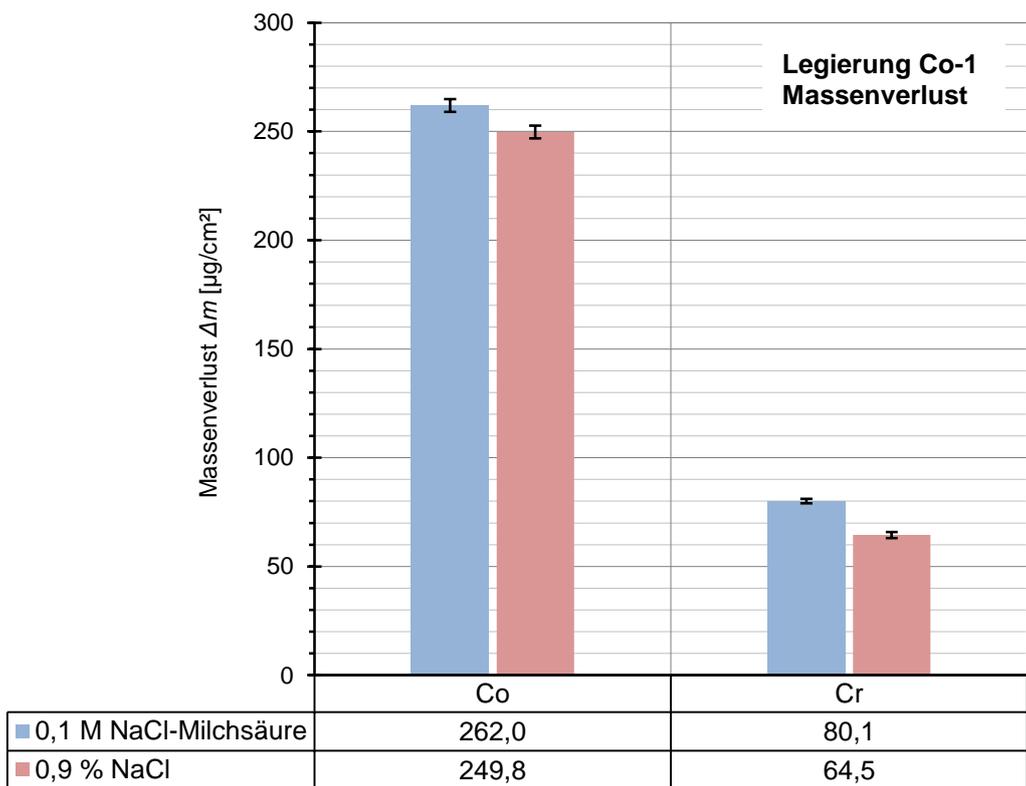


Abbildung 43: Analytisch (ICP-OES) bestimmte Massenverluste für Legierung Co-1 in den beiden Elektrolyten 0,9 % NaCl und 0,1 M NaCl-Milchsäure

Abbildung 43 zeigt, dass bei Legierung Co-1 der Massenverlust in 0,9 % NaCl gegenüber 0,1 M NaCl-Milchsäure bei Kobalt um ca. 5 % und bei Chrom um ca. 18 % geringer ist. Die absoluten Massenverluste entsprechen dabei in etwa ihrem prozentualen Legierungsanteil.

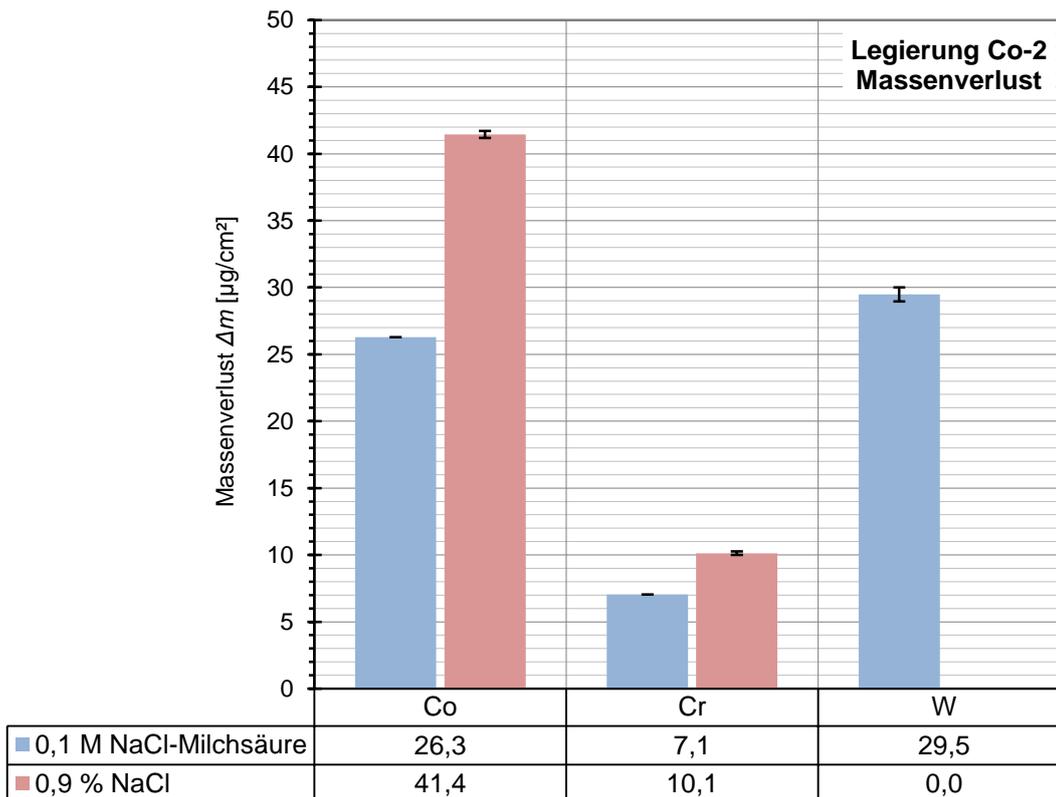


Abbildung 44: Analytisch (ICP-OES) bestimmte Massenverluste für Legierung Co-2 in den beiden Elektrolyten 0,9 % NaCl und 0,1 M NaCl-Milchsäure

Aus Abbildung 44 wird ersichtlich, dass im Elektrolyt 0,1 M NaCl-Milchsäure die Elemente Kobalt und Chrom bei Legierung Co-2 weniger in Lösung gegangen sind, als in 0,9 % NaCl. Auffallend ist, dass Wolfram, das den geringsten prozentualen Legierungsanteil hat, in 0,1 M NaCl-Milchsäure am meisten in Lösung gegangen ist. Im Elektrolyten 0,9 % NaCl ging Wolfram allerdings nicht in Lösung.

4 Ergebnisse

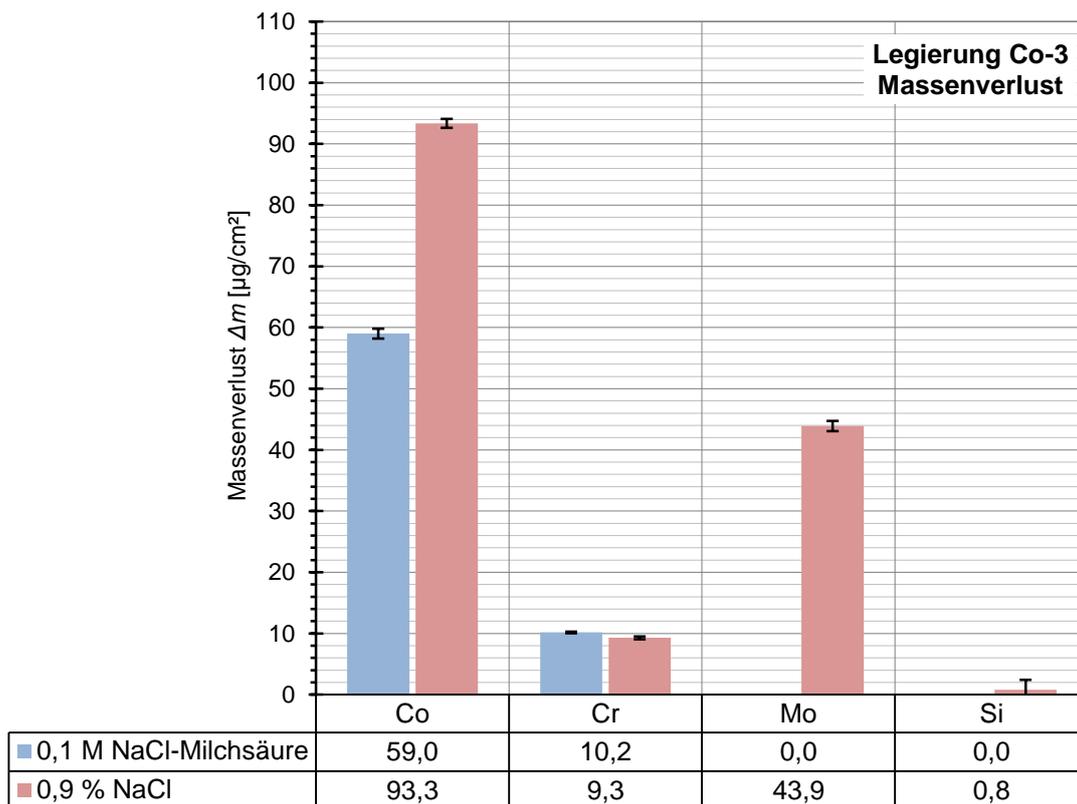


Abbildung 45: Analytisch (ICP-OES) bestimmte Massenverluste für Legierung Co-3 in den beiden Elektrolyten 0,9 % NaCl und 0,1 M NaCl Milchsäure

Abbildung 45 zeigt, dass bei Legierung Co-3 im Elektrolyten 0,1 M NaCl-Milchsäure nur die Elemente Kobalt und Chrom in Lösung gegangen sind. Im Elektrolyten 0,9 % NaCl dagegen gingen zusätzlich zu Kobalt und Chrom auch noch Molybdän und Silizium in Lösung. Prozentual gesehen hat in 0,9 % NaCl das Element Chrom den geringsten Massenverlust.

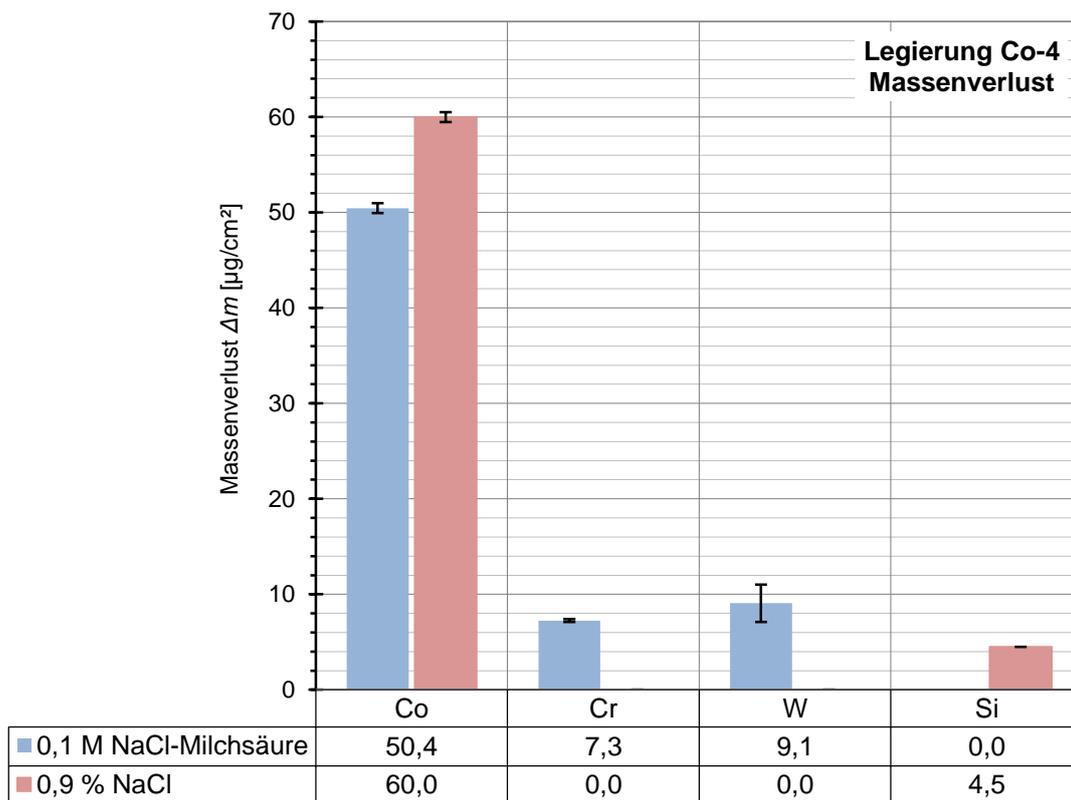


Abbildung 46: Analytisch (ICP-OES) bestimmte Massenverluste für Legierung Co-4 in den beiden Elektrolyten 0,9 % NaCl und 0,1 M NaCl-Milchsäure

Aus Abbildung 46 wird ersichtlich, dass bei Legierung Co-4 der Massenverlust von Kobalt in beiden Elektrolyten am höchsten ist. Die Elemente Chrom und Wolfram haben nur im Elektrolyten 0,1 M NaCl-Milchsäure einen Massenverlust, während Silizium nur in 0,9 % NaCl in Lösung geht.

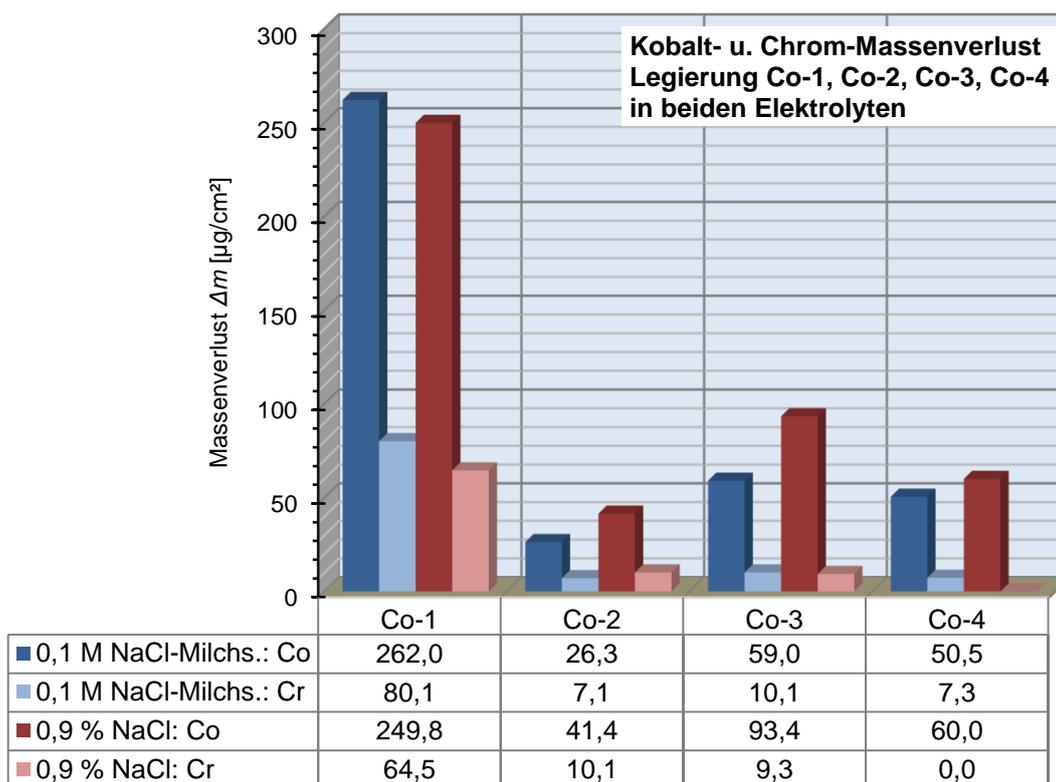


Abbildung 47: Analytisch (ICP-OES) bestimmte Kobalt- und Chrom-Massenverluste für Legierung Co-1 bis Co-4 in den beiden Elektrolyten 0,9 % NaCl und 0,1 M NaCl-Milchsäure

Aus der Abbildung 47 wird ersichtlich, dass bei allen vier Legierungen in beiden Elektrolyten hauptsächlich Kobalt in Lösung geht. Weiterhin fällt auf, dass die Ionenabgabe der Legierung Co-1 wesentlich größer ist, als die der restlichen drei Legierungen.

Wie in Abschnitt 3.2.1.4 beschrieben, dient zur Verifizierung der analytischen Ergebnisse das Faraday'sche Gesetz, mittels dessen der Massenverlust näherungsweise ermittelt werden kann. Da die analytische Auswertung (Tabelle 19 bis Tabelle 22 im Anhang) zeigt, dass v.a. Kobalt in Lösung geht, wurde zur Berechnung des Massenverlustes das Element Kobalt (Co) mit einer Molmasse M von 58,933 g/mol und einer Wertigkeit $z = 2$ herangezogen.

Die zur Berechnung eingesetzten Ladungsmengen Q sind in den Tabelle 11 bis Tabelle 18 im Anhang aufgelistet.

Dabei entspricht:

- A_{ges} : Ladungsmenge der integrierten Gesamtfläche
- Q1: Ladungsmenge der integrierten Fläche I (E_z -300 mV)
→ nach *Reclaru et al.*
- Q2: Ladungsmenge der integrierten Fläche II (300 mV-700 mV)
→ nach *Reclaru et al.*
- Q3: Ladungsmenge der integrierten Fläche III (700 mV-1000 mV)
→ nach *Reclaru et al.*
- Q6: Ladungsmenge der integrierten Fläche III (E_z -900 mV)
→ nach *Maranche et al.*

Bei den berechneten Kobaltabgaben erfolgte zunächst die Berechnung des gesamten Massenverlustes mit der Ladungsmenge A_{ges} .

Ferner wurde, wie in Abschnitt 3.2.1.4 bereits erwähnt, zur weiteren Absicherung noch die Zonencoulometrie herangezogen. Mittels dieser konnten mit den Ladungsmengen Q1, Q2, Q3 und Q6 die Massenverluste für die einzelnen Zonen berechnet werden. Dabei sollten, sowohl die Summe der berechneten Massenverluste von Zone I, II und III, als auch der Massenverlust der mittels Q6 berechnet wurde, in etwa dem gesamten Massenverlust entsprechen.

Zusätzlich erfolgte noch die prozentuale Bestimmung des Massenverlustes bezogen auf den Anteil des Elements an der Legierung.

Die nachfolgenden Abbildung 48 bis Abbildung 55 stellen die analytisch bestimmten Kobaltabgaben den berechneten Kobaltabgaben gegenüber.

4 Ergebnisse

Dabei entspricht:

$\Delta m_{\text{Analytisch}}$: analytisch bestimmter Massenverlust in [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$]

Δm_{Anteil} : berechneter Massenverlust in [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] für die gesamte Fläche reduziert auf den prozentualen Anteil des Elements an der gesamten Legierung

Δm_{Ages} : berechneter Massenverlust in [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] für die gesamte Fläche

Δm_{Q1} : berechneter Massenverlust in [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] für Zone I (E_z -300 mV)
→ nach *Reclaru et al.*

Δm_{Q2} : berechneter Massenverlust in [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] für Zone II (300 mV-700 mV)
→ nach *Reclaru et al.*

Δm_{Q3} : berechneter Massenverlust in [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] für Zone III (700 mV-1000 mV)
→ nach *Reclaru et al.*

$\Delta m_{\text{Q1,Q2,Q3}}$: berechneter Massenverlust in [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] für Zone I bis Zone III
→ nach *Reclaru et al.*

Δm_{Q6} : berechneter Massenverlust in [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] für Zone III (E_z -900 mV)
→ nach *Maranche et al.*

Während in der Abbildung 48 bis Abbildung 55 die mittleren Massenverluste für Kobalt dargestellt sind, können die mittleren Massenverluste der restlichen Legierungselemente der Tabelle 23 bis Tabelle 30 im Anhang entnommen werden.

4 Ergebnisse

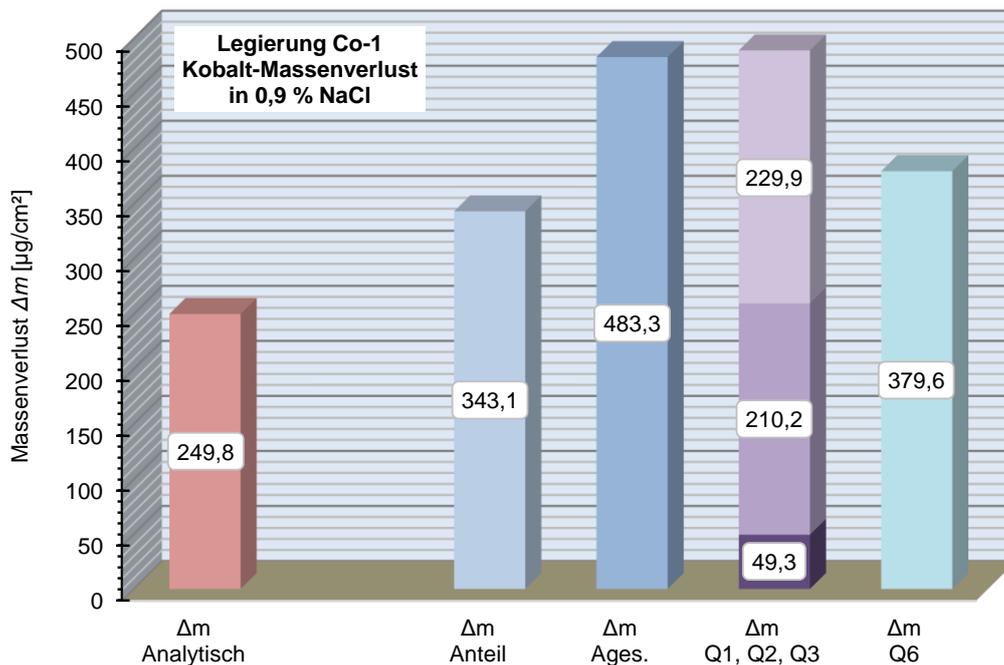


Abbildung 48: Kobaltmassenverlust für Legierung Co-1 in 0.9 % NaCl: analytisch bestimmter Kobaltmassenverlust ↔ berechneter Kobaltmassenverlust

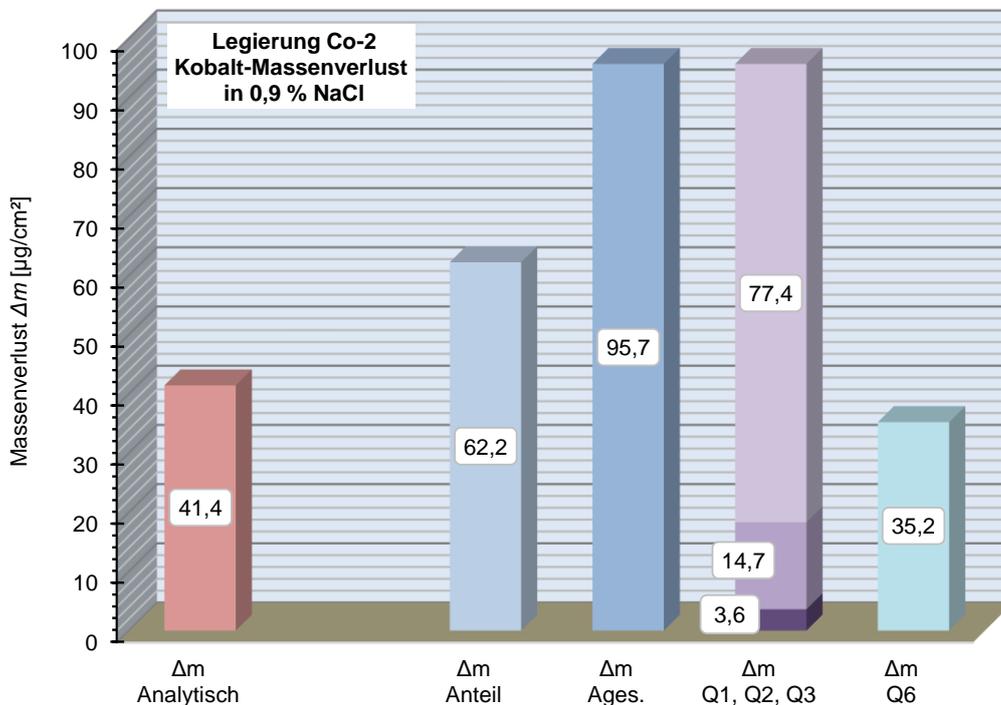


Abbildung 49: Kobaltmassenverlust für Legierung Co-2 in 0,9 % NaCl: analytisch bestimmter Kobaltmassenverlust ↔ berechneter Kobaltmassenverlust

4 Ergebnisse

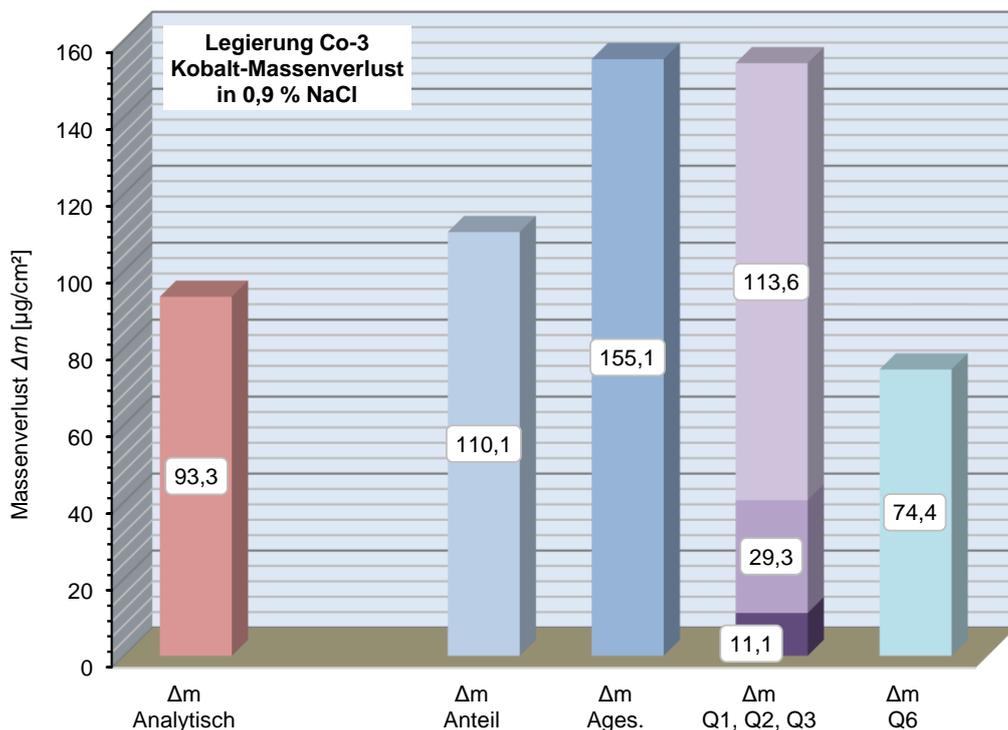


Abbildung 50: Kobaltmassenverlust für Legierung Co-3 in 0,9 % NaCl: analytisch bestimmter Kobaltmassenverlust ↔ berechneter Kobaltmassenverlust

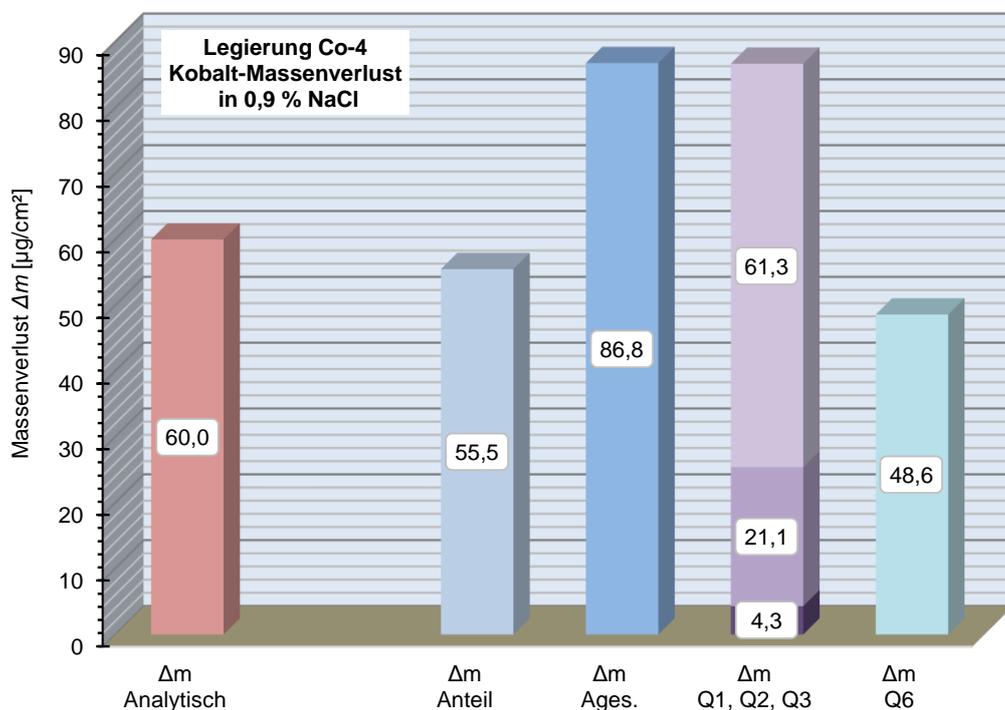


Abbildung 51: Kobaltmassenverlust für Legierung Co-4 in 0,9 % NaCl: analytisch bestimmter Kobaltmassenverlust ↔ berechneter Kobaltmassenverlust

4 Ergebnisse

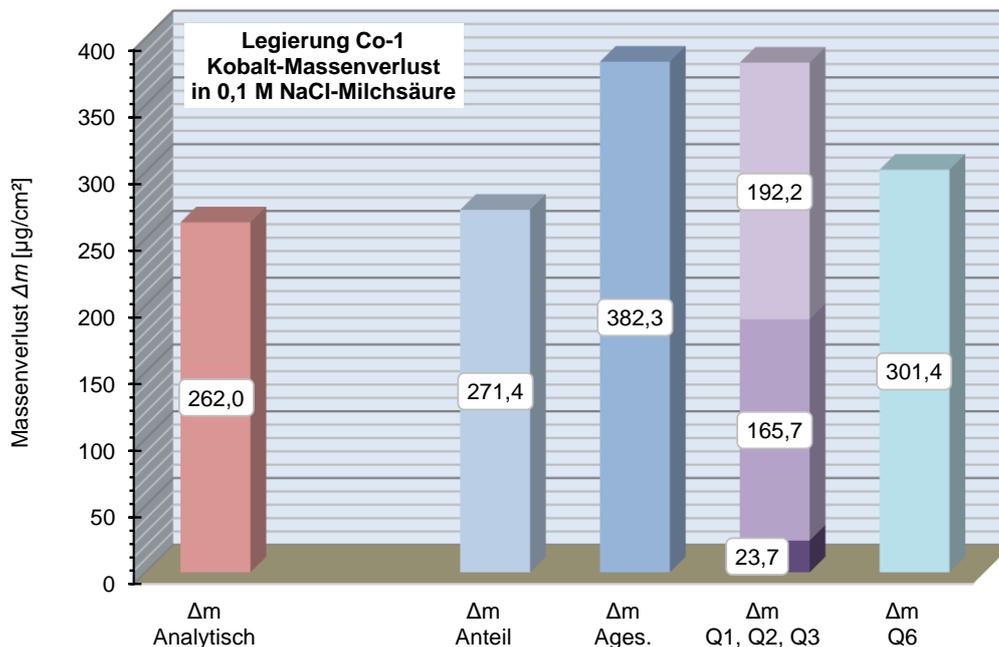


Abbildung 52: Kobaltmassenverlust für Legierung Co-1 in 0,1 M NaCl-Milchsäure: analytisch bestimmter Kobaltmassenverlust ↔ berechneter Kobaltmassenverlust

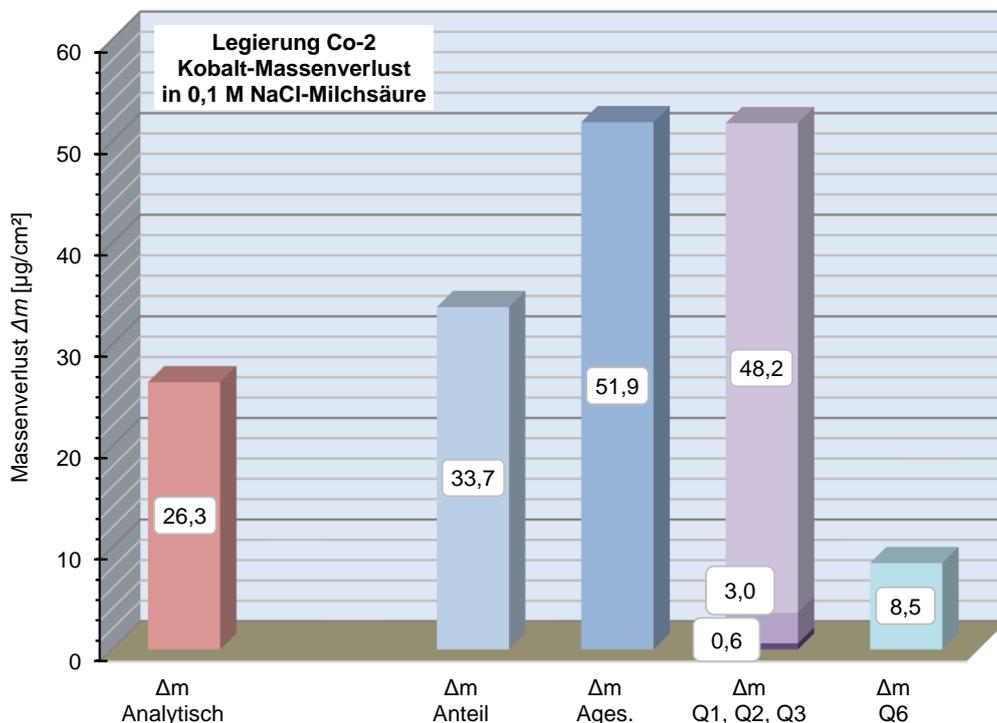


Abbildung 53: Kobaltmassenverlust für Legierung Co-2 in 0,1 M NaCl-Milchsäure: analytisch bestimmter Kobaltmassenverlust ↔ berechneter Kobaltmassenverlust

4 Ergebnisse

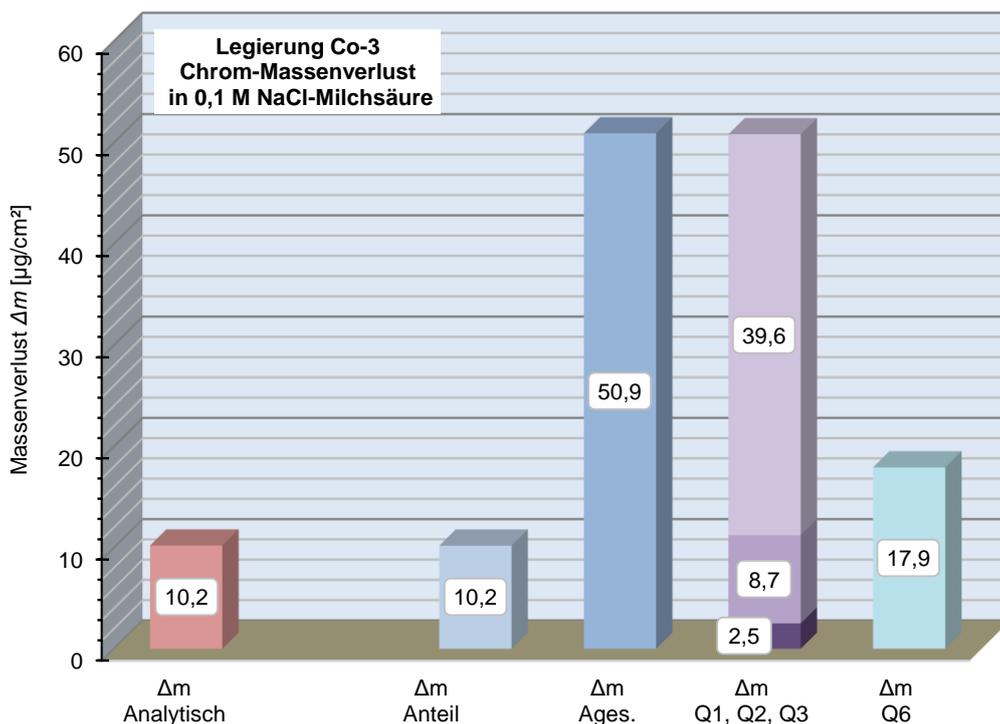


Abbildung 54: Kobaltmassenverlust für Legierung Co-3 in 0,1 M NaCl-Milchsäure: analytisch bestimmter Kobaltmassenverlust ↔ berechneter Kobaltmassenverlust

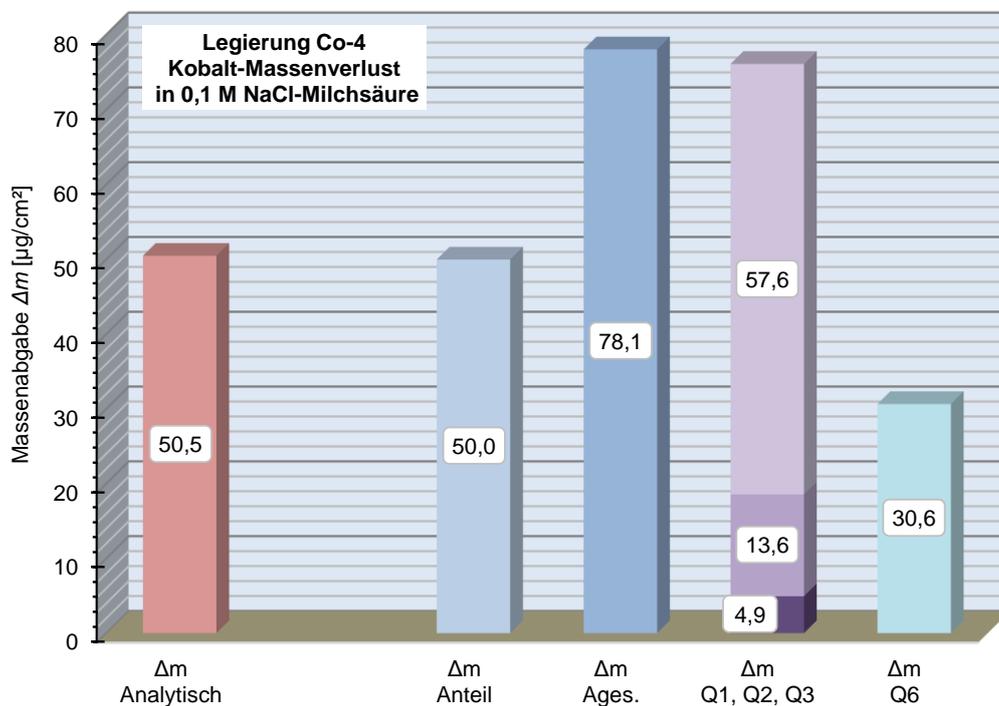


Abbildung 55: Kobaltmassenverlust für Legierung Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure: analytisch bestimmter Kobaltmassenverlust ↔ berechneter Kobaltmassenverlust

4.1.2.3 Statistische Ergebnisse

In den nachfolgenden Tabelle 6 und Tabelle 7 sind die Ergebnisse des t-Testes dargestellt. Dabei wird der analytische Stichproben-Mittelwert des Kobaltmassenverlustes mit den berechneten Stichprobenwerten verglichen. Während sich in Tabelle 6 die Werte auf die Gesamtfläche beziehen, sind diese in Tabelle 7 noch auf den Legierungsanteil reduziert. Zusätzliche Ergebniswerte der PASW-Statistikauswertung finden sich in der Tabelle 31 bis Tabelle 34 im Anhang.

Tabelle 6: Ergebnisse des t-Testes: Kobaltmassenverlust: analytischer Wert / berechnete Werte auf die Gesamtfläche bezogen

Legierung		Signifikanzwerte berechnet (2-seitig)		Beurteilung der Signifikanzwerte (2-seitig)	
		0,1 M NaCl-Milchsäure	0,9 % NaCl	0,1 M NaCl-Milchsäure	0,9 % NaCl
Co-1	Δm_{Ages}	0,027	0,000	n.s.	s.
	$\Delta m_{Q1,Q2,Q3}$	0,028	0,000	n.s.	s.
	Δm_{Q6}	0,387	0,003	n.s.	s.
Co-2	Δm_{Ages}	0,000	0,000	s.	s.
	$\Delta m_{Q1,Q2,Q3}$	0,000	0,000	s.	s.
	Δm_{Q6}	0,000	0,230	s.	n.s.
Co-3	Δm_{Ages}	0,008	0,001	s.	s.
	$\Delta m_{Q1,Q2,Q3}$	0,008	0,001	s.	s.
	Δm_{Q6}	0,002	0,060	s.	n.s.
Co-4	Δm_{Ages}	0,000	0,078	s.	n.s.
	$\Delta m_{Q1,Q2,Q3}$	0,001	0,079	s.	n.s.
	Δm_{Q6}	0,004	0,412	s.	n.s.

s. = signifikant

n.s. = nicht signifikant

4 Ergebnisse

Tabelle 7: Ergebnisse des t-Testes: Kobaltmassenverlust: analytischer Wert / berechnete Werte auf den Legierungsanteil reduziert

Legierung		Signifikanzwerte berechnet (2-seitig)		Beurteilung der Signifikanzwerte (2-seitig)	
		0,1 M NaCl-Milchsäure	0,9 % NaCl	0,1 M NaCl-Milchsäure	0,9 % NaCl
Co-1	Δm_{Ages}	0,808	0,004	n.s.	s.
	$\Delta m_{Q1,Q2,Q3}$	0,818	0,004	n.s.	s.
	Δm_{Q6}	0,228	0,428	n.s.	n.s.
Co-2	Δm_{Ages}	0,021	0,002	s.	s.
	$\Delta m_{Q1,Q2,Q3}$	0,021	0,002	s.	s.
	Δm_{Q6}	0,000	0,004	s.	s.
Co-3	Δm_{Ages}	0,702	0,082	n.s.	n.s.
	$\Delta m_{Q1,Q2,Q3}$	0,714	0,090	n.s.	n.s.
	Δm_{Q6}	0,000	0,002	s.	s.
Co-4	Δm_{Ages}	0,909	0,723	n.s.	n.s.
	$\Delta m_{Q1,Q2,Q3}$	0,687	0,718	n.s.	n.s.
	Δm_{Q6}	0,000	0,048	s.	n.s.

s. = signifikant

n.s. = nicht signifikant

4.2 Ergebnisse des statischen Immersionstests

4.2.1 Analytische Auswertung der Elektrolytlösung

Es zeigte sich, dass die korrosiv kontaminierten Korrosionslösungen am Mess- tag farb- und rückstandlos waren.

In der nachfolgenden Abbildung 56 bis Abbildung 65 werden für jede unter- suchte Legierung sowohl die gemittelten flächenbezogenen Massenverluste der Legierungselemente für die jeweiligen Messtage, als auch die aufsummierten Massenverluste für den gesamten Messzeitraum dargestellt. In der Tabelle 35

bis Tabelle 38 im Anhang können die einzelnen Messergebnisse, sowie die berechneten Standardabweichungen entnommen werden.

Bei Niob, Mangan und Silizium waren so geringe Konzentrationen in Lösung gegangen, dass sie unterhalb der Nachweisgrenze ($<0,03 \mu\text{g/ml}$) lagen und somit in den nachfolgenden Abbildungen nicht aufgeführt sind. In allen Abbildungen sind daher nur die Massenverluste der Hauptlegierungselemente dargestellt.

Aus Abbildung 56 bis Abbildung 65 geht hervor, dass bei allen Legierungen Kobalt den größten Massenverlust aufzeigt.

Massenverlust der Legierung Co-1

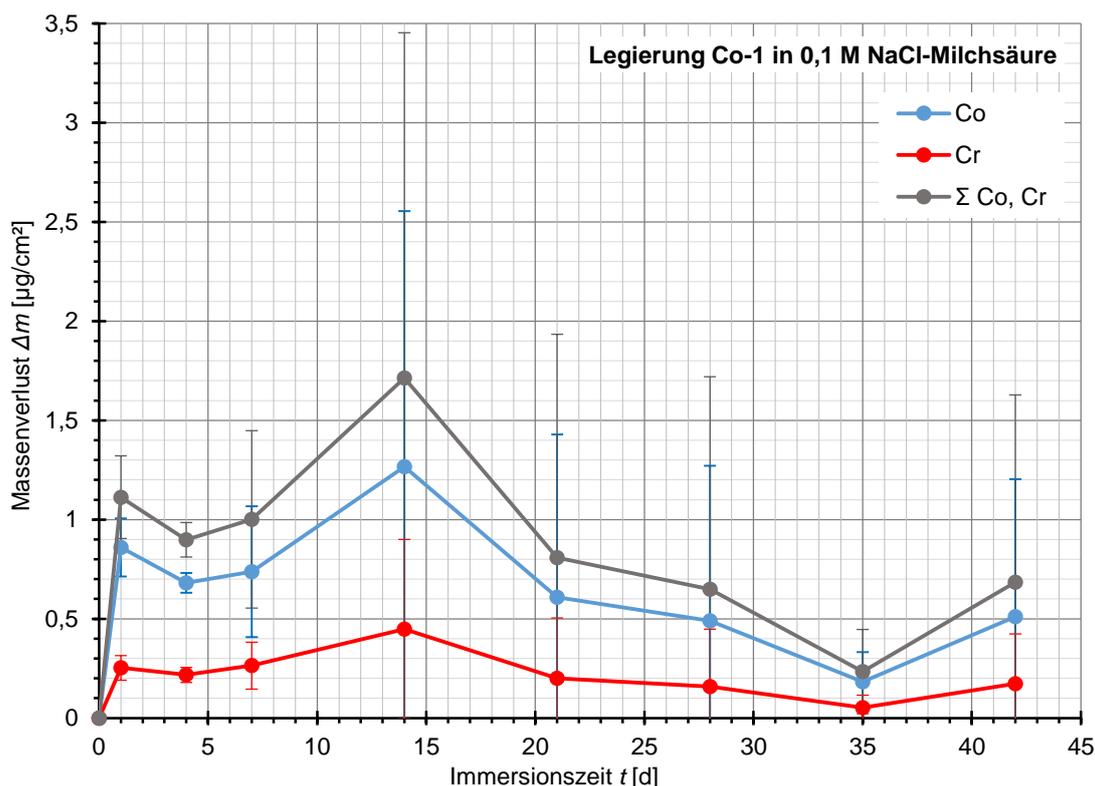


Abbildung 56: Massenverlust von Legierung Co-1 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Die Abbildung 56 zeigt, dass nach dem 1. und nach dem 14. Einlagerungstag die größten Massenverluste für Kobalt und Chrom vorliegen. Da jedoch die Zeitabstände zwischen den Einlagerungsperioden ungleich lang sind, reduziert sich der scheinbar hohe Massenverlust der beiden Legierungselemente in der

4 Ergebnisse

4. Einlagerungsperiode (7. bis 14. Tag), so dass sich ein kontinuierlicher Massenverlust ergibt. Die Abbildung 56 zeigt ferner, dass es in der 5. bis 7. Einlagerungsperiode (15. bis 35. Tag) zu einer weiteren Abnahme der Massenverluste für Kobalt und Chrom kommt. In der letzten Messperiode jedoch nehmen die Massenverluste der beiden Legierungselemente wieder zu.

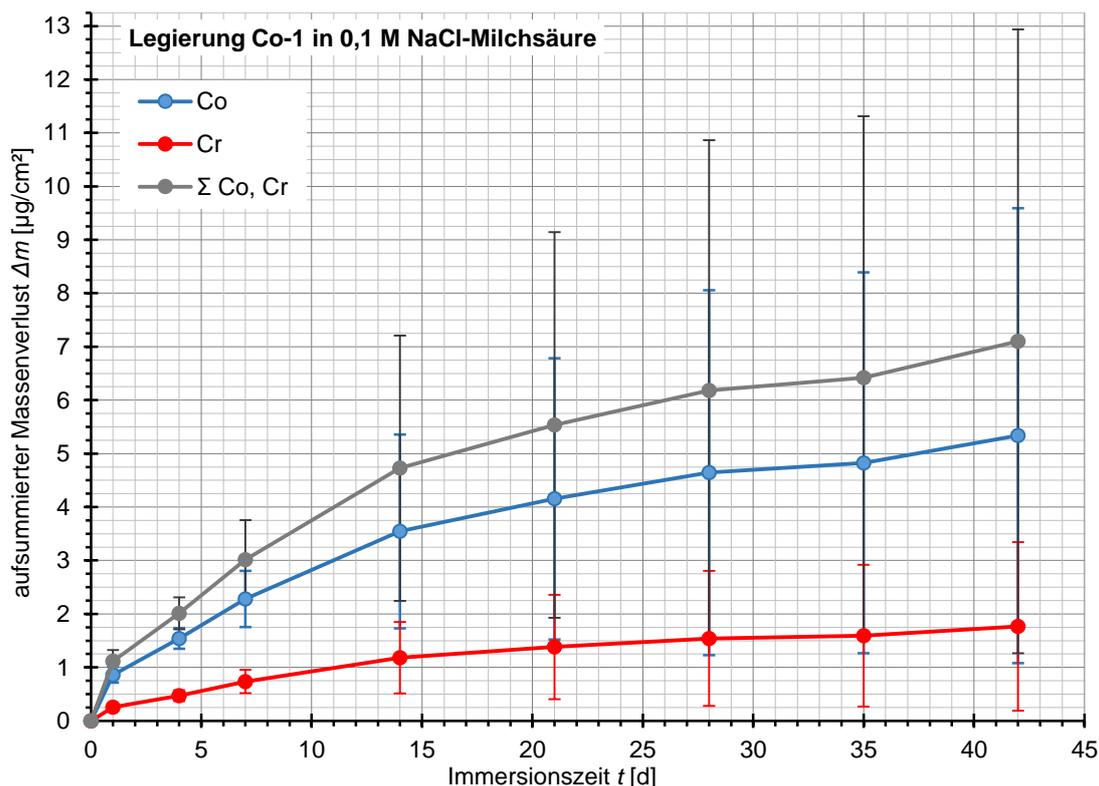


Abbildung 57: aufsummierter Massenverlust von Legierung Co-1 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Aus Abbildung 57 wird ersichtlich, dass der aufsummierte Massenverlust aller Legierungselemente einen degressiven Verlauf hat. Ab dem 14. Einlagerungstag wird diese Degression jedoch schwächer und der aufsummierte Massenverlust des Legierungselement Chroms wird annähernd linear. Über die gesamte Messdauer hinweg, beträgt das Verhältnis der aufsummierten Massenverluste von Kobalt / Chrom ca. 3:1.

Massenverlust der Legierung Co-2

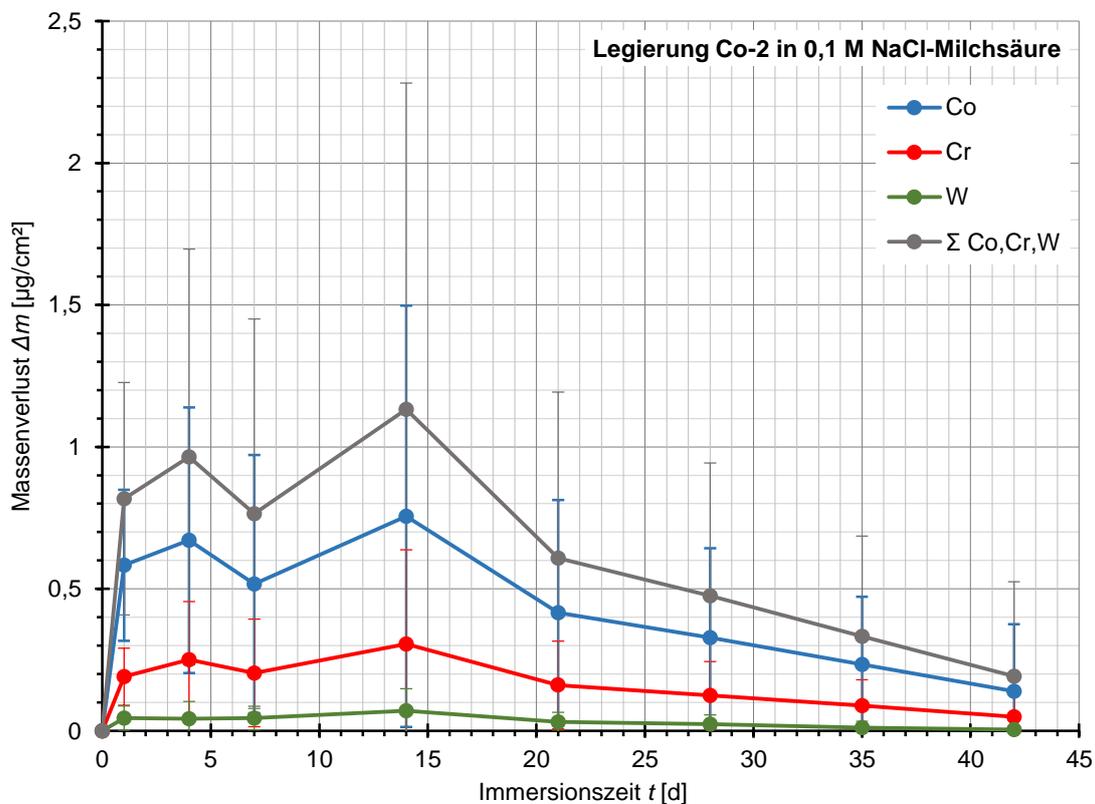


Abbildung 58: Massenverlust von Legierung Co-2 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Aus der Abbildung 58 wird ersichtlich, dass nach dem 4. und nach dem 14. Einlagerungstag die größten Massenverluste für Kobalt und Chrom vorliegen. Wie oben bereits geschildert, sind jedoch die Zeitabstände zwischen den Einlagerungsperioden ungleich lang. Folglich reduziert sich auch hier der scheinbar hohe Massenverlust der beiden Legierungselemente in der 4. Einlagerungsperiode (7. Bis 14. Tag), so dass sich ein kontinuierlicher Massenverlust ergibt. Ab dem 14. Einlagerungstag verringert sich der Massenverlust für alle Legierungselemente. Nach dem 21. Einlagerungstag weisen alle Legierungselemente dann einen abgeschwächten linearen Massenverlust auf.

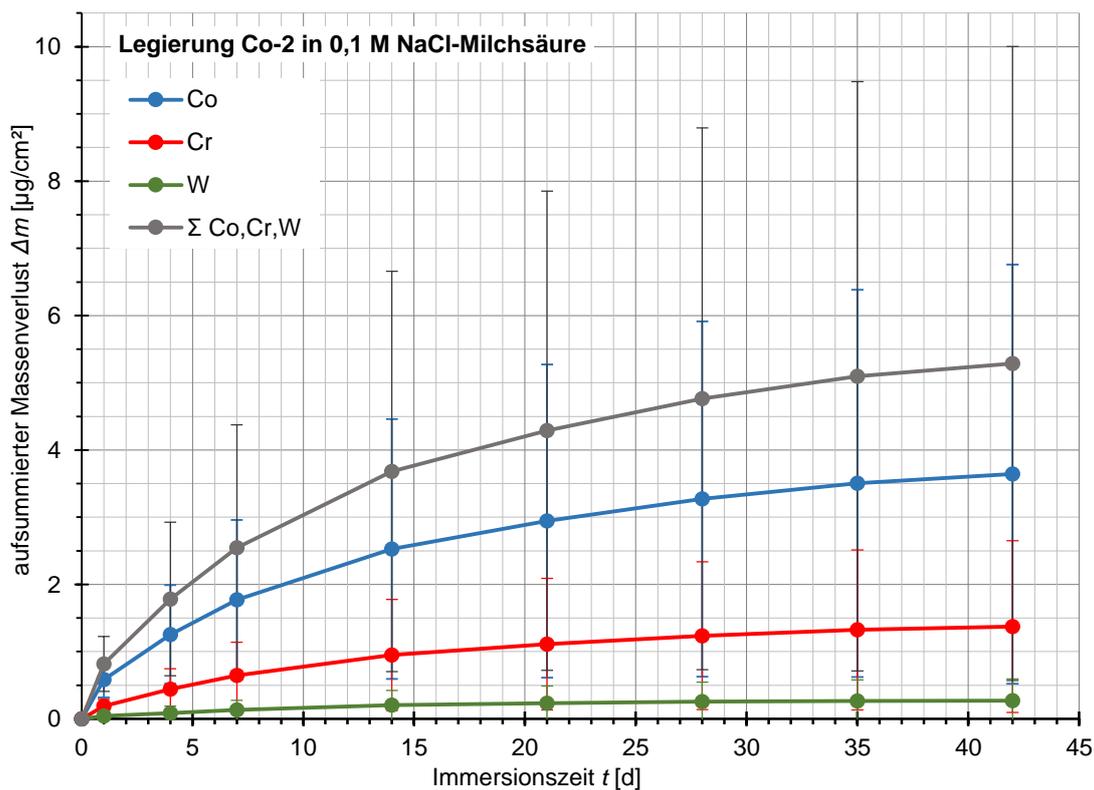


Abbildung 59: aufsummierter Massenverlust von Legierung Co-2 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Abbildung 59 veranschaulicht, dass der aufsummierte Massenverlust aller Legierungselemente einen degressiven Verlauf hat. Über die gesamte Messdauer hinweg, entspricht das Verhältnis der aufsummierten Massenverluste von Kobalt, Chrom und Wolfram in etwa ihren Legierungsanteilen.

Massenverlust der Legierung Co-3

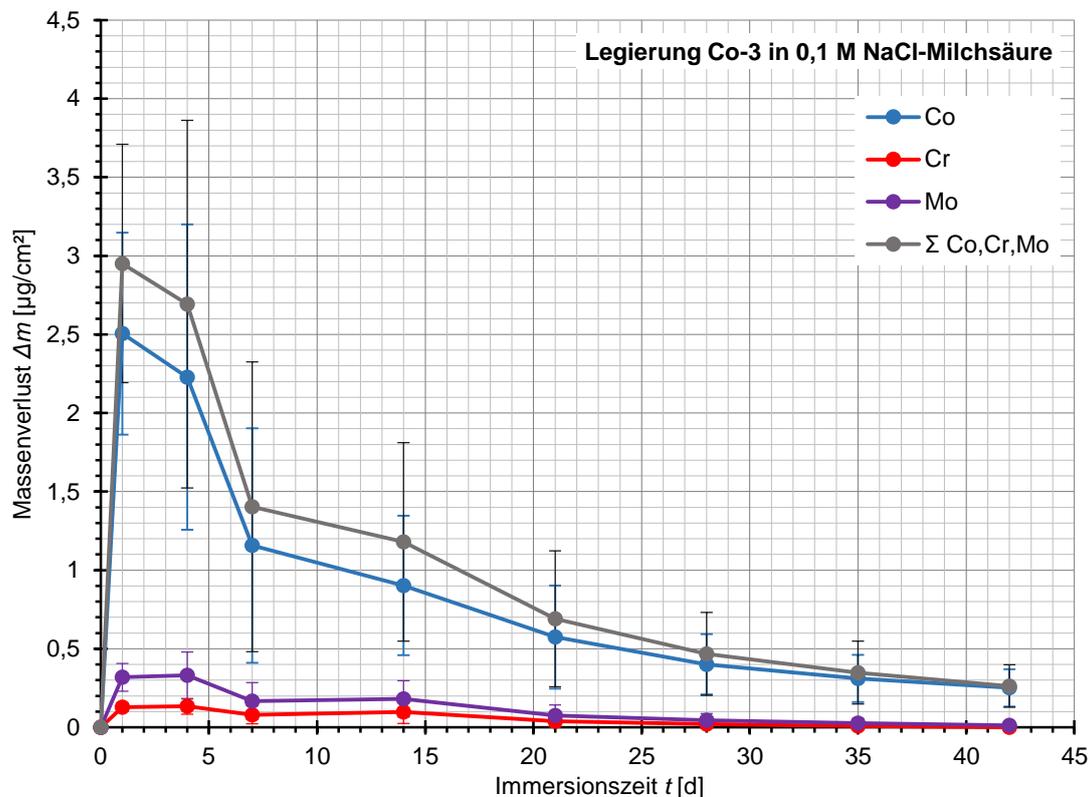


Abbildung 60: Massenverlust von Legierung Co-3 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Wie der Abbildung 60 zu entnehmen ist, erreichen die Analysewerte der Legierung Co-3 am ersten Einlagerungstag ihr Maximum und sinken in den folgenden Tagen rapide ab. Gegen Ende der Messzeit fallen die Legierungselemente Chrom und Molybdän sogar unter die Nachweisgrenze.

4 Ergebnisse

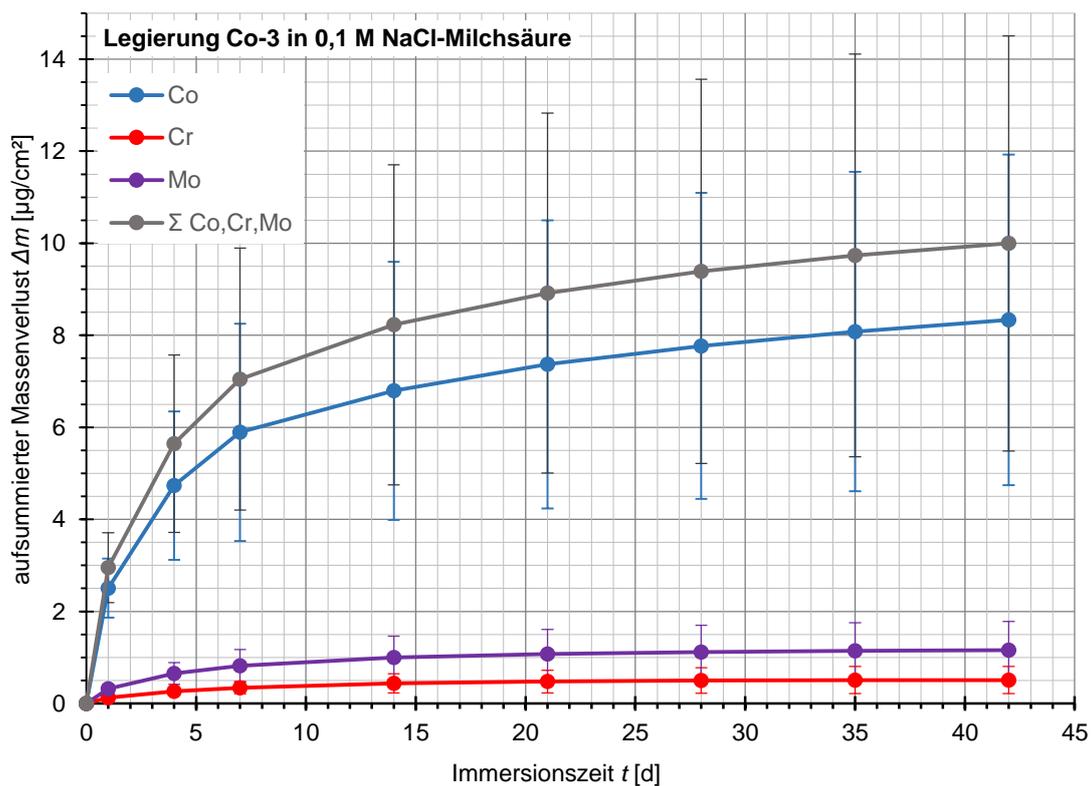


Abbildung 61: aufsummierter Massenverlust von Legierung Co-3 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Abbildung 61 zeigt, dass für alle Legierungselemente ein degressiver Verlauf der aufsummierten Massenverluste vorliegt. Ab Mitte der Messzeit ist bei den Legierungselementen Chrom und Molybdän der aufsummierte Massenverlust annähernd linear. Über die gesamte Messdauer ist das Element Kobalt mit ca. 85 % am Gesamtmassenverlust beteiligt. Am wenigsten zum Gesamtmassenverlust trägt Chrom bei, obwohl es höher beilegiert ist als Molybdän.

Massenverlust der Legierung Co-4

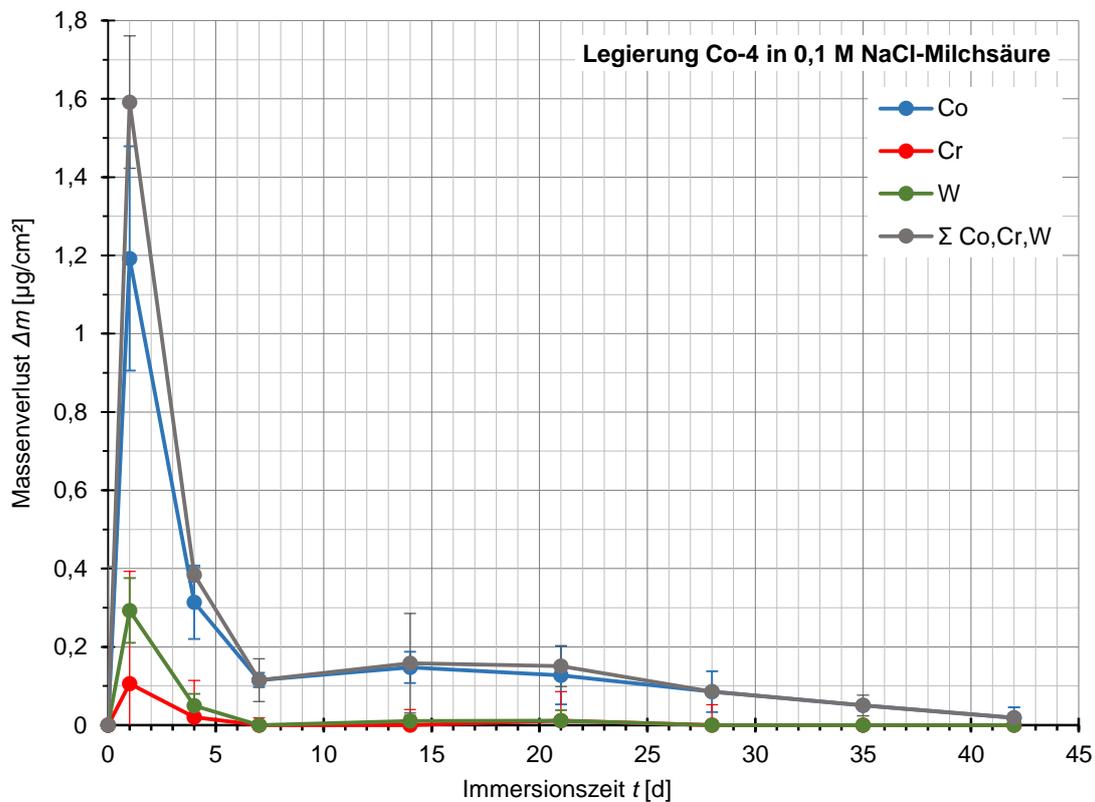


Abbildung 62: Massenverlust von Legierung Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Wie der Abbildung 62 zu entnehmen ist, erreichen die Analysewerte der Legierung Co-3 am ersten Einlagerungstag ihr Maximum und sinken in den folgenden Tagen rapide ab. Bereits am 7. Einlagerungstag fallen die Legierungselemente Chrom und Wolfram unter die Nachweisgrenze. Bei Kobalt kommt es in der 4. Einlagerungsperiode zu einem leichten Einstieg des Massenverlusts. Danach fällt der Massenverlust annähernd linear ab und erreicht am 42. Tag fast die Nachweisgrenze.

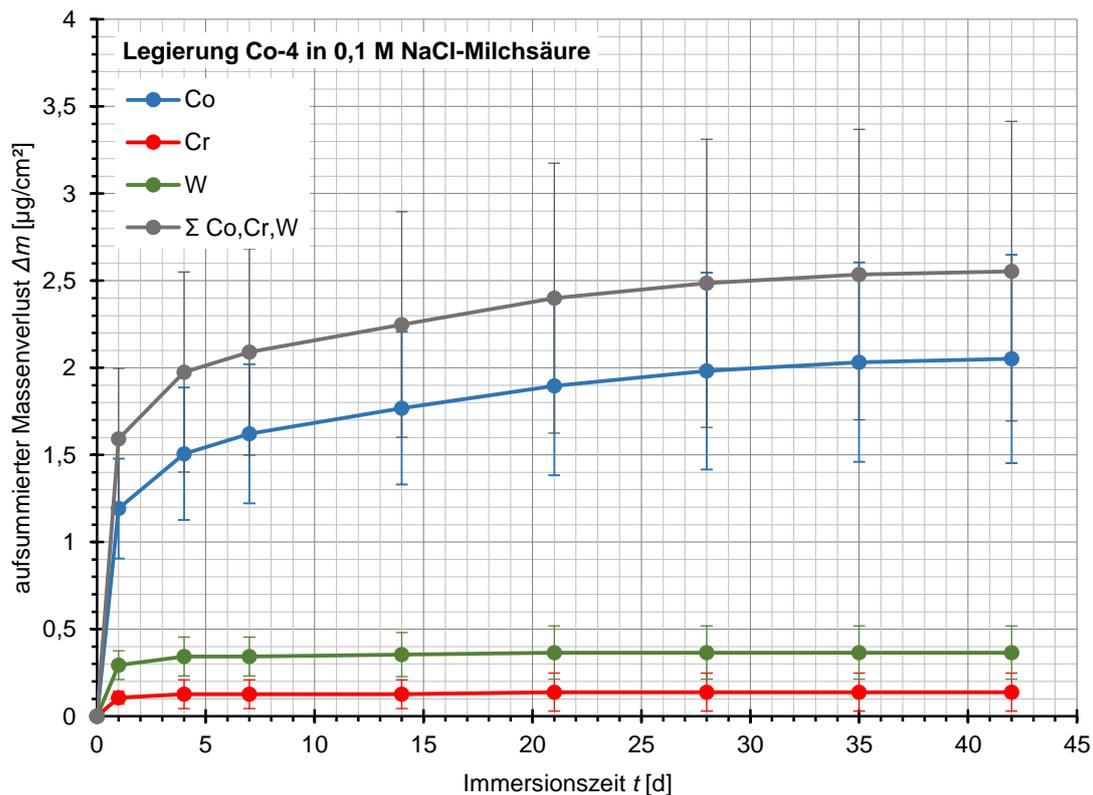


Abbildung 63: aufsummierter Massenverlust von Legierung Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Abbildung 63 veranschaulicht, dass für alle Legierungselemente ein degressiver Verlauf der aufsummierten Massenverluste vorliegt. Über die gesamte Messdauer ist Kobalt anteilmäßig mit 80 % am Gesamtmassenverlust beteiligt. Obwohl Chrom einen höheren Legierungsanteil als Wolfram hat, trägt es gegenüber diesem weniger zum Gesamtmassenverlust bei.

Die Abbildung 64 und Abbildung 65 zeigen nochmals die analytischen Ergebnisse des statischen Immersionstest der vier Legierungen im direkten Vergleich.

4 Ergebnisse

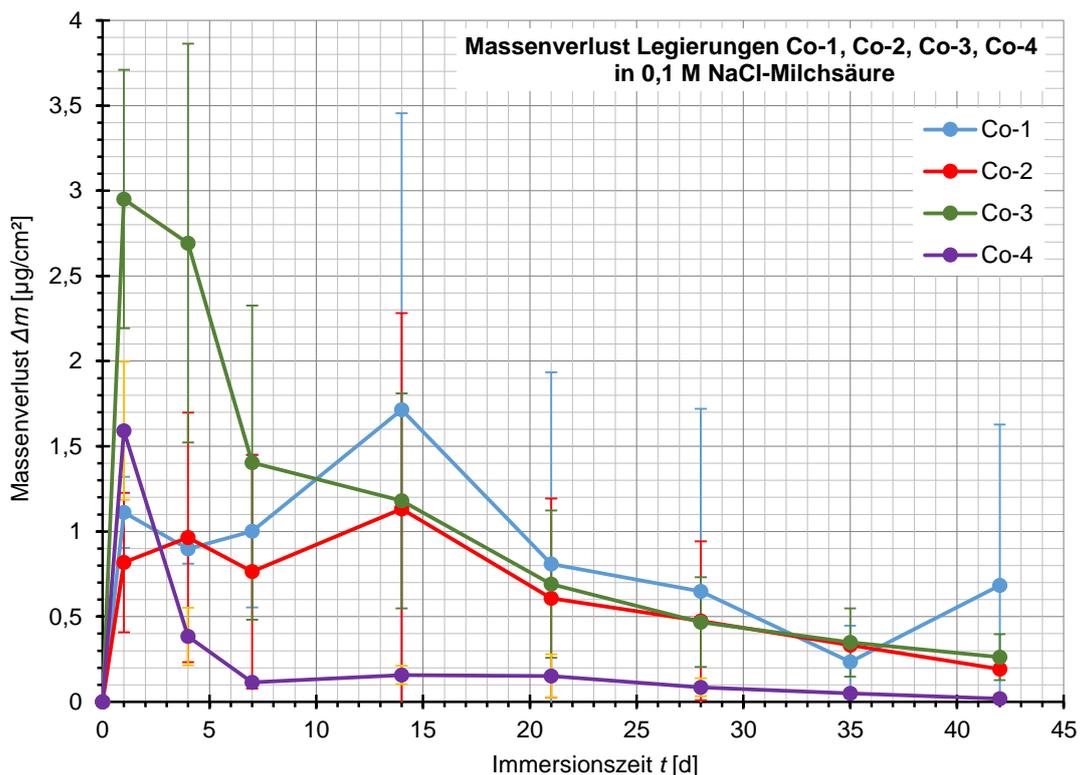


Abbildung 64: Vergleich der Massenverluste von Legierung Co-1 bis Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

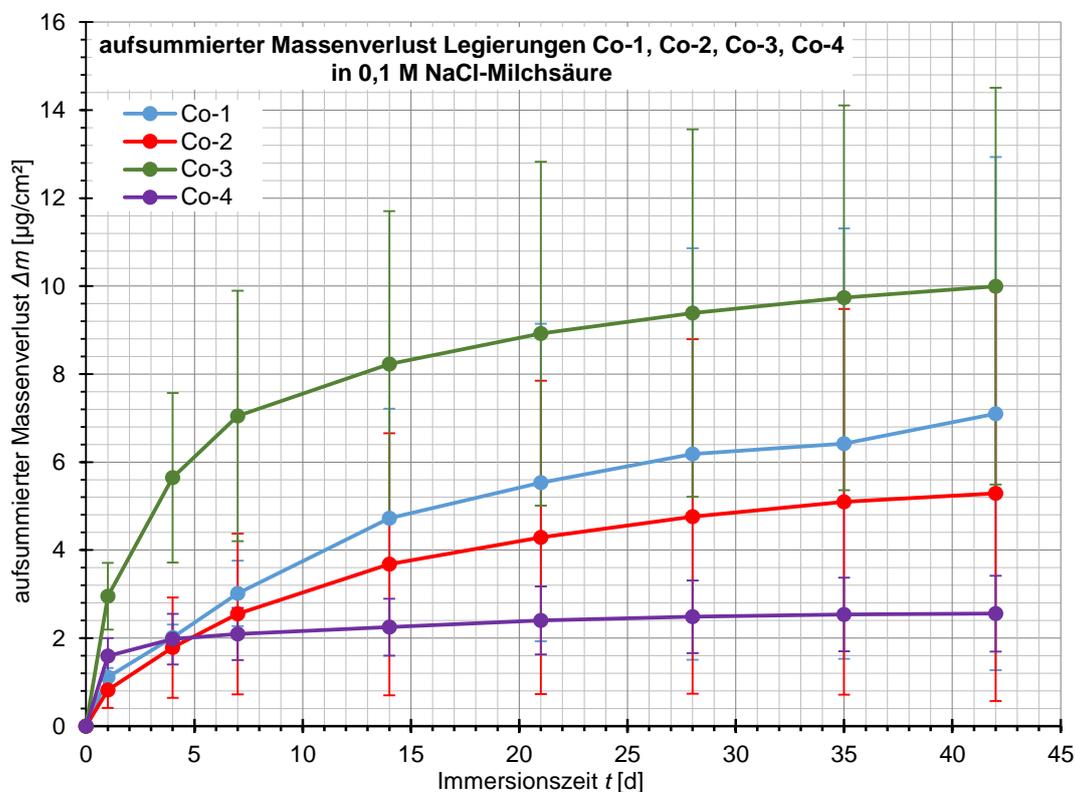


Abbildung 65: Vergleich der aufsummierten Massenverluste von Legierung Co-1 bis Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

5 Diskussion

5.1 Diskussion von Material und Methodik

Anliegen dieser Arbeit ist es, vier experimentelle Kobaltbasislegierungen (Co-1, Co-2, Co-3 und Co-4) mit unterschiedlicher Zusammensetzung, in Anlehnung an DIN EN ISO 10271:2011 [47] mittels des elektrochemischen Tests und des statischen Immersionstests auf ihre Korrosionsstabilität zu untersuchen. Da es sich bei den Versuchen um In-vitroUntersuchungen handelt, ist es wichtig Bedingungen zu wählen, die der Realität möglichst nahe kommen, um so eine aussagekräftige Antwort auf die Eignung der untersuchten Legierung für die Anwendung in der Praxis zu bekommen. Allerdings erschweren einige Parameter die analoge Übertragung der In-vitroUntersuchungen auf den klinischen Einsatz. So müssen beispielsweise im Rahmen dieser Untersuchung, sowohl die Parameter Elektrolyt und Temperatur, die zur Simulation des Mundhöhlenmilieus dienten, als auch die verwendeten Prüfkörper für sich, kritisch betrachtet werden.

Verwendete Elektrolyte

Zur Simulation der Mundhöhlenverhältnisse kamen für den elektrochemischen Test, in Anlehnung an DIN EN ISO 10271:2011 [47], 0,1 M NaCl-Milchsäure und 0,9 % NaCl zum Einsatz. Beim statischen Immersionstest hingegen wurde lediglich 0,1 M NaCl-Milchsäure verwendet.

Beiden Elektrolyten ist gemeinsam, dass sie die Passivschicht schädigenden Chlorid-Ionen, welche zu den aggressivsten Anionen des menschlichen Speichels zählen, enthalten [106], [89], [90]. Somit eigneten sich die Elektrolyte zur Imitation realer Bedingungen.

Weiterhin wurde auch der Bandbreite der in der Mundhöhle vorkommenden pH-Werte Rechnung getragen.

Im Allgemeinen liegt der pH-Wert des Speichels im Bereich zwischen 5,25 und 7,86 [87]. Somit konnte mittels des im Versuch eingesetzten Elektrolyten

0,9 % NaCl das Korrosionsgeschehen unter „normalen“ Mundhöhlenverhältnissen aufgezeigt werden.

Da allerdings nach der Aufnahme von säurehaltigen Getränken und Lebensmittel oder unter Plaquebelägen und in sauerstoffarmen Gebieten (z.B. Spalten) ein niedriger pH-Wert herrscht [1], [95], [96], [87], [59], [88], konnte der künstliche Speichel (0,1 M NaCl-Milchsäure) mit seinem aggressiven pH-Wert von 2,3 näherungsweise das Korrosionsgeschehen unter extremen Bedingungen simulieren.

Abschließend kann gesagt werden, dass mittels der verwendeten Elektrolyte die Einflüsse wichtiger Parameter, nämlich pH-Wert und Chlorid-Ionen, auf das Korrosionsgeschehen aufgezeigt werden konnten. Der komplexen Zusammensetzung des menschlichen Speichels, sowie individuellen Schwankungsbreiten, konnte jedoch keine Rechnung getragen werden.

Elektrolyttemperatur

Die Elektrolyttemperatur betrug bei allen Versuchen konstant 37 ± 1 °C.

In der Mundhöhle beträgt die Temperatur i.d.R. 37 ± 1 °C [91]. Allerdings können, abhängig von der Nahrungs- und Getränkeaufnahme, auch Temperaturen von 0 °C bis 70 °C vorkommen [33]. Diese Temperaturschwankungen beeinflussen das Korrosionsgeschehen. Denn so beschleunigen Temperaturerhöhungen den Korrosionsvorgang, während eine Senkung der Temperatur den Korrosionsvorgang verlangsamt [93]. Da diese Temperaturschwankungen jedoch nur kurzfristig während der Nahrungsaufnahme auftreten, sind diese vernachlässigbar. Folglich war es für eine praxisnahe Korrosionsprüfung ausreichend eine mittlere Temperatur von 37 ± 1 °C zu wählen.

Verwendete Prüfkörper

Da die Oberflächenbeschaffenheit das Korrosionsgeschehen beeinflusst, ist die Herstellung und die Bearbeitung der Probenoberflächen von entscheidender Bedeutung [81]

Im Rahmen der Untersuchung wurden die Prüfkörper, in Anlehnung an DIN EN ISO 10271:2011 [47], mit Siliciumcarbid-Papier aufsteigender Körnung (SiC 180 bis SiC 1200) nass geschliffen.

Rauhtiefenmessungen an Metalloberflächen, die mit verschiedenen in der Zahntechnik zum Einsatz kommenden Gummipolieren bearbeitet worden waren, zeigten Rautiefenprofile die in etwa denen von 1200er Naßschleifpapier verursachten Rauhtiefen entsprachen.

Folglich kann davon ausgegangen werden, dass durch die Verwendung von 1200er Naßschleifpapier ein praxisnaher Oberflächenzustand erreicht wurde [93]. Ferner wurde für jede Legierung neues Schleifpapier verwendet, um keine Legierungsbestandteile zu verschleppen. Außerdem wurden die Prüfkörper nach dem Polieren noch im Ultraschallbad gereinigt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass keine Polierrückstände auf der Oberfläche verblieben sind, die das Korrosionsgeschehen beeinflusst hätten und so zu einer Verfälschung der Ergebnisse geführt hätten.

Allerdings ist anzumerken, dass eventuell nur die im Rahmen des elektrochemischen Tests verwendeten Prüfkörper, bedingt durch ihre kleinere Größe, einen praxisnahen Oberflächenzustand aufwiesen. Die Prüfkörper, die im statischen Immersionstest zum Einsatz kamen, entsprachen annähernd dem in der DIN EN ISO 10271:2011 [47] geforderten Format. Allerdings war es, bedingt durch die beträchtliche Größe der Proben, schwierig diese gleichmäßig zu polieren. Somit kann nicht mit absoluter Sicherheit gewährleistet werden, dass alle Prüfkörper homogene Rautiefen aufweisen. Unterschiedliche Rautiefen jedoch bedingen ein unterschiedliches Korrosionsverhalten, was wiederum ein Vergleichen der Ergebnisse erschwert.

Ergänzend kann angemerkt werden, dass bei der Bearbeitung der Prüfkörper für den elektrochemischen Test eine mögliche Verfälschung der Messergebnisse dahingegen vermieden wurde, dass der Drahtteil, der sich in der Elektrolytlösung befand, mittels eines Schrumpfschlauches aus Silikon isoliert wurde. Somit wurde sichergestellt, dass der Korrosionsabtrag ausschließlich auf die Messflächen der Prüfkörper beschränkt blieb.

Ferner wurden die Prüfkörper in korrosionsresistenten Kunststoff Palavit G eingebettet, so dass an den Kontaktstellen der Probe mit der Halterung und an Probekanten keine Spaltkorrosion auftreten konnte. Denn bei einer vorliegenden Spaltkorrosion würde diese schneller voranschreiten als eine Lochkorrosion und bereits in einem niedrigeren Potentialbereich beginnen, was zu einer Veränderung der Gesamtstromdichte führen würde. Dies wiederum würde das Messergebnis verfälschen [109].

Neben den oben genannten Parametern müssen auch die Versuchsdurchführungen bezüglich bestimmter Aspekte kritisch betrachtet werden.

Versuchsdurchführung elektrochemischer Test

Die DIN EN ISO 10271:2011 [47] schreibt vor, dass vor Versuchsbeginn eine Entlüftung der Elektrolyte mittels Stickstoff oder Argon erfolgen sollte.

Diese Begasung mit hochreinem Stickstoff (99,996%) dient der Entfernung des im Elektrolyten gelösten Sauerstoffs und somit zur Simulation sauerstoffarmer Bezirke, wie sie in vivo z.B. in Spalten vorkommen [93], [76].

Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurde auf eine Begasung mit Stickstoff allerdings verzichtet, da i.d.R. intraoral die Anzahl der Bereiche überwiegt, an denen immer noch eine gewisse Restsauerstoffmenge vorhanden ist. Darüber hinaus wird das Korrosionsverhalten in sauerstoffarmen Bezirken, durch die Verwendung von 0,1 M NaCl-Milchsäure, hinreichend untersucht.

Allerdings ist anzumerken, dass eine gewisse Vorsicht geboten ist, wenn die im Rahmen dieser Untersuchung gewonnenen Ergebnisse mit Ergebnissen, bei denen eine Entlüftung stattgefunden hat, verglichen werden. Denn so ergeben Messungen, bei denen Sauerstoff entfernt wurde, niedrigere Durchbruchpotentiale und höhere Passivstromdichten als Messungen in mit Luftsauerstoff gesättigten Elektrolyten [93].

Bei der Versuchsdurchführung wurde die potentiodynamische Polarisierung lediglich bis zu einem Potential von 1 V durchgeführt, da höhere Potentiale klinisch nicht mehr bedeutsam sind [93].

Bezüglich der Polarisationsgeschwindigkeit von 1 mV/s kann gesagt werden, dass diese sich als günstig erwies. Denn so dauerte ein Versuchsdurchlauf für einen Prüfkörper im Schnitt lediglich 27 Minuten. Darüber hinaus waren die Messergebnisse und deren graphische Darstellung bei der gewählten Polarisationsgeschwindigkeit ausreichend genau und aussagekräftig.

Da allerdings die Polarisationsgeschwindigkeit den Verlauf von Stromdichte-Potential-Kurven beeinflusst [93], muss hier angemerkt werden, dass beim Vergleichen, der im Rahmen dieser Untersuchung gewonnenen Ergebnisse, mit anderen Ergebnissen immer berücksichtigt werden muss, welche Polarisationsgeschwindigkeit gewählt wurde. Denn so ergeben sich bei einer schnelleren Schrittgeschwindigkeit höhere Durchbruchpotentiale und Korrosionsstromdichten, als dies bei langsameren Polarisationsgeschwindigkeiten der Fall wäre [93].

Versuchsdurchführung statischer Immersionstest

Für die Durchführung des statischen Immersionstestes kam, wie bereits erwähnt, lediglich der Elektrolyt 0,1 M NaCl-Milchsäure zum Einsatz. Begründen lässt sich dies darin, dass durch den niedrigeren pH-Wert von 0,1 M NaCl-Milchsäure aggressivere Versuchsbedingungen herrschten und es somit in kürzerer Zeit zur Herauslösung größerer Mengen an Korrosionsprodukten kam, was wiederum die spätere analytische Auswertung erleichterte [98]. Darüber hinaus kam auch im elektrochemischen Test 0,1 M NaCl-Milchsäure zum Einsatz, so dass ein Vergleichen der Ergebnisse des statischen Immersionstest mit denen des elektrochemischen Tests möglich war. Außerdem ist es für eine Einschätzung der Korrosionsresistenz einer Legierung ausreichend, wenn diese unter aggressiveren Bedingungen geprüft wird. Denn ist eine Legierung unter aggressiven Bedingungen korrosionsbeständig, ist sie dies auch unter normalen Bedingungen.

Von großer Bedeutung ist neben der Wahl des Elektrolyten auch das Verhältnis der Prüfkörperoberfläche zum Volumen der eingesetzten Elektrolytlösung. Denn je geringer die Oberfläche im Vergleich zur Elektrolytmenge ist, desto mehr Ionen werden freigesetzt [98], [110].

Im Rahmen dieser Versuche betrug die Prüfkörperoberfläche im Mittel $0,7 \text{ cm}^2$. Folglich betrug das Verhältnis $1,3 \text{ ml pro } 1 \text{ cm}^2$ und lag somit etwas über dem in der DIN EN ISO 10271:2011 [47] geforderten Verhältnis von 1 ml pro cm^2 .

Abschließend ist zu erwähnen, dass bei der Versuchsdurchführung mehrere Maßnahmen unternommen wurden, um ein Verfälschen der Ergebnisse zu vermeiden.

So erfolgte, wie in der DIN EN ISO 10271:2011 [47] gefordert, die Lagerung der Prüfkörper einzeln in Polypropylen-Röhrchen.

Weiterhin wurde für die Durchführung des Probenwechsels eine Kunststoffpinzette verwendet, um so eine metallische Kontamination zu vermeiden. Ferner wurde die Kunststoffpinzette nach jedem Probenwechsel gereinigt, so dass ein Vermischen der Korrosionslösungen vermieden wurde.

Darüber hinaus wurde kurz vor jedem Probenwechsel die Elektrolytlösung geschüttelt, so dass gewährleistet war, dass in jeder Probe dieselbe Ionenkonzentration vorlag.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

5.2.1 Diskussion der Ergebnisse des elektrochemischen Tests

Das Korrosionsverhalten eines Metalls bzw. einer Legierung lässt sich anhand verschiedener Messwerte der Stromdichte-Potential-Kurven interpretieren.

Dabei weist eine Legierung, ganz allgemein ausgedrückt, ein gutes Korrosionsverhalten auf, wenn folgende Aspekte gegeben sind [111]:

- ein möglichst edles Ruhepotential
- ein möglichst ausgedehnter Passivbereich mit einer niedrigen Passivstromdichte
- möglichst keine aktiven Peaks
- ein Durchbruchpotential, welches höher liegt als die im Mund denkbaren Spannungen
- ein möglichst niedriger Korrosionsstrom

Beim elektrochemischen Test wurde zunächst das Ruhepotential ermittelt, welches einen ersten Hinweis bezüglich der Korrosionsresistenz einer Legierung liefert. Denn wie bereits erwähnt, impliziert ein hohes Ruhepotential eine hohe Korrosionsresistenz. So z.B. weisen Edelmetalllegierungen, deren Ruhepotentiale im positiven Bereich liegen, eine bessere Korrosionsresistenz auf, als Nichtedelmetalllegierungen, deren Ruhepotentiale im negativen Bereich liegen [112]. Jedoch ist anzumerken, dass die Bestimmung des Ruhepotentials alleine nicht zur Bestimmung der Korrosionsresistenz ausreicht. Dies zeigt sich z.B. bei Titan, welches zwar ein niedriges Ruhepotential hat, aufgrund der guten Passivschichtbildung aber eine gute Korrosionsresistenz aufweist [14]. Darüber hinaus muss auch erwähnt werden, dass das Ruhepotential stark von der verwendeten Elektrolytlösung abhängt. Dabei ist v.a. eine drastische Verschiebung der Potentiale zu positiveren Werten mit sinkenden pH-Wert von 7,4-2,3 zu verzeichnen [112].

Bei der Ermittlung der Ruhepotentiale im Rahmen dieser Untersuchung bestätigte sich auch für die vier untersuchten Legierungen das bereits Geschilderte. Denn so haben auch diese NEM-Legierungen ihre Ruhepotentiale im negativen Bereich. Darüber hinaus weisen sie auch im Elektrolyten mit dem niedrigeren pH-Wert (0,1 M NaCl-Milchsäure) tendenziell ein positiveres Ruhepotential auf, als im Elektrolyten mit dem höheren pH-Wert (0.9 % NaCl).

Zusätzlich fallen bei Betrachtung der Ruhepotentiale weitere Aspekte auf:

- Die Legierungen mit dem höheren Chromgehalt (Co-1 und Co-2) haben, trotz niedrigerem PRE-Wert, tendenziell positivere Ruhepotentiale.
- Die Legierung Co-2 weist in beiden Elektrolyten die „positivsten“ Ruhepotentiale auf.
- Während die Potentialdifferenzen zwischen den Elektrolyten bei den Legierungen Co-1, Co-2 und Co-4 mit ca. 90-110 mV in etwa gleich sind, weist Legierung Co-3 mit 140 mV einen um ca. 25 % höheren Potentialanstieg in 0,1 M NaCl-Milchsäure auf.

Aus diesen Aspekten lässt sich daher Folgendes schließen:

Zunächst bestätigt sich die Tatsache, dass Chrom der Legierungsbestandteil ist, der am meisten zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit beiträgt [36], [37]. Denn so weisen die Legierungen mit dem höheren Chromgehalt, trotz niedrigerem PRE-Wert, positivere Ruhepotentiale auf. Auch eine, von der Sektion Medizinische Werkstoffkunde und Technologie der Universitätsklinik Tübingen, durchgeführte Studie zum Korrosionsverhalten von Kobalt-Chrom-Legierungen, zeigte ein ähnliches Ergebnis. In dieser Studie, in der vier experimentelle Kobalt-Chrom-Legierungen, die sich lediglich im Chromgehalt unterschieden, untersucht wurden, wiesen die Legierungen mit dem höheren Chromgehalt auch die positiveren Ruhepotentiale auf [113]

Darüber hinaus zeigen, die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Versuche, auch die korrosionsvermindernde Wirkung von Wolfram auf, da die Legierung Co-2 positivere Ruhepotentiale als Legierung Co-1 aufweist, sich von dieser aber lediglich durch ein Zulegieren von Wolfram unterscheidet.

Ferner zeigt sich am Beispiel der Legierung Co-3, dass sich die Substitution eines Teils des Chromgehaltes durch Molybdän positiv auf das Ruhepotential auswirkt, wenn diese Legierung einem Elektrolyten mit niedrigerem pH-Wert ausgesetzt ist. Auch in der Stahlindustrie ist diese positive Wirkung von Molybdän seit langem bekannt. Denn so ist Molybdän nach Chrom bei den austenitisch und austenitisch-ferritischen Edelstählen das Hauptlegierungselement, da es in nichtoxidierenden Säuren v.a. die Beständigkeit gegen Flächenkorrosion erhöht [114].

Abschließend kann gesagt werden, dass Legierung Co-2 im Hinblick auf das Ruhepotential die „beste“ Legierung ist. Allerdings reicht es, wie bereits am Beispiel von Titan aufgeführt, nicht aus allein anhand des Ruhepotentials Rückschlüsse auf das Korrosionsverhalten zu ziehen. Statt dessen müssen weitere Auswertkriterien, wie z.B die Stromdichte bei 300 mV bzw. 500 mV, das Durchbruchpotential und der Passivierungsbereich herangezogen werden. Ferner hilft auch das Ergebnis der analytischen Auswertung der korrosiv kontaminierten Elektrolytlösung bei der Beurteilung des Korrosionsverhaltens.

Stromdichte bei 300 mV / 500 mV ($i_{(300\text{ mV})}$ und $i_{(500\text{ mV})}$)

In-vivo-Messungen von Oxidationspotentialen ergaben, dass im Speichel zwischen verschiedenen Legierungstypen gelegentlich Potentialdifferenzen von 300 mV, maximal aber auch 500 mV vorkommen können. Folglich sollten Dentallegierungen, die dem Mundhöhlenmilieu ausgesetzt sind, selbst unter aggressivsten klinischen Bedingungen ihre Durchbruchspotentiale oberhalb von mindestens 300 mV, besser noch oberhalb 500 mV haben [108], [78], [76]. Da zudem bei Stromdichten über 10^{-5} A/cm^2 mit Lochkorrosion zu rechnen ist, sollten zusätzlich die Stromdichten unterhalb von 10^{-5} A/cm^2 liegen [108].

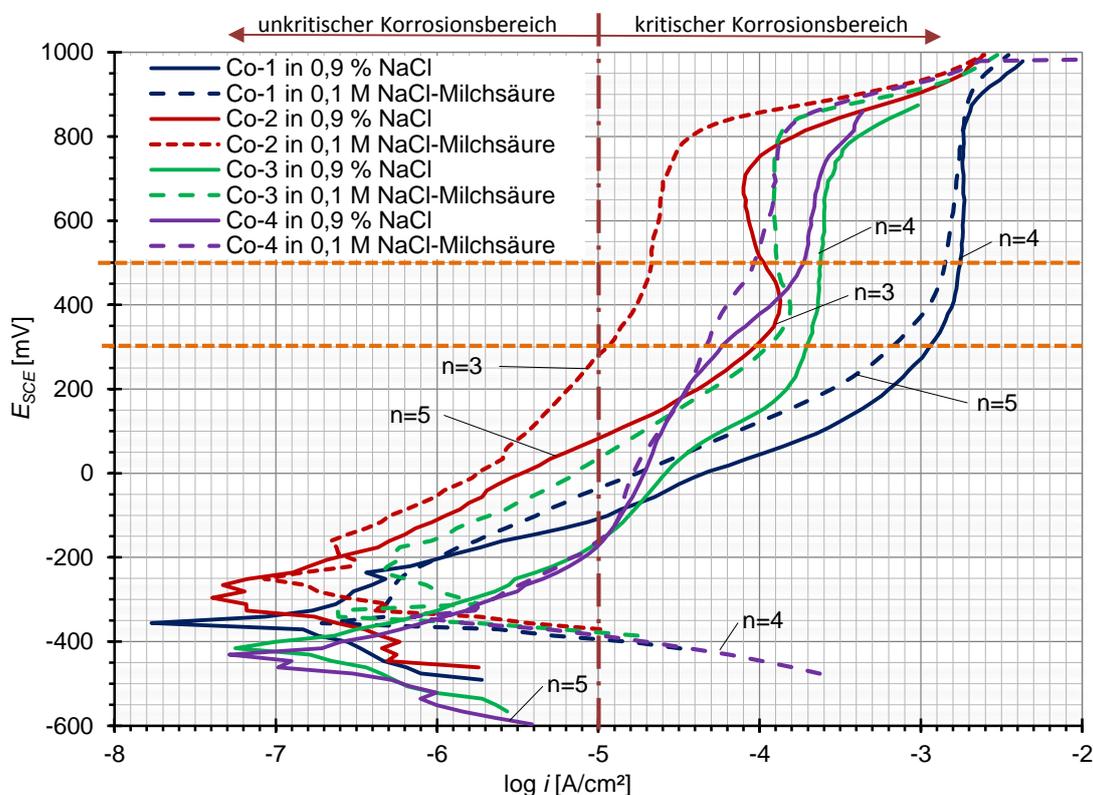


Abbildung 66: Potentiodynamische Messkurven der vier Legierungen in beiden Elektrolyten bei $i_{(300\text{ mV})}$ und $i_{(500\text{ mV})}$

In der vorliegenden Abbildung 66 markieren die gestrichelten Linien die erlaubten Grenzen. Dabei wird ersichtlich, dass die Durchbruchpotentiale (E_{p-2}) aller vier Legierungen sowohl oberhalb 300 mV, als auch oberhalb 500 mV liegen. Allerdings wird von allen Legierungen die tolerierbare Stromdichte 10^{-5} A/cm^2 überschritten, wobei die Stromdichten im Elektrolyten 0,1 M NaCl-Milchsäure niedriger sind.

Jedoch zeigt sich, dass es durch das Zulegieren von Elementen zu einer „Verbesserung“ kommt. Denn so zeigen die Legierungen Co-2, Co-3 und Co-4, die mit Wolfram oder Molybdän ein weiteres Legierungselement haben, eine um eine Zehnerpotenz niedrigere Stromdichte bei 300 mV und 500 mV.

Dabei weisen die Legierungen, denen Wolfram zulegiert wurde, die niedrigeren Stromdichten auf. Da ferner Legierung Co-2 die niedrigsten Stromdichten bei 300 mV und 500 mV hat, scheint es am Besten zu sein, wenn unter Beibehaltung des hohen Chromanteils, Wolfram zulegiert wird.

Eine noch höhere Zulegierung von Wolfram unter Substitution eines Chromanteils bringt nicht diesen Effekt, wie der Vergleich mit Legierung Co-4 zeigt.

Zu einem ähnlichen Ergebnis kam auch die bereits oben erwähnte Studie des Universitätsklinikums Tübingen [113], in der bei einer Kobalt-Chrom-Legierung, unter Beibehaltung des Wolframanteils, der Chromanteil erhöht wurde. Dabei zeigte sich, dass ein hoher Chromanteil am meisten zur Erniedrigung der Korrosionsstromdichte beiträgt. Denn so wurde die Stromdichte-Potential-Kurve mit steigendem Chromanteil nicht nur zu niedrigeren Stromdichten verschoben, sondern auch der Passivbereich deutlicher ausgebildet.

Durchbruchpotential (E_p-1 und E_p-2)

Das Durchbruchpotential, welches durch einen rapiden Stromanstieg gekennzeichnet ist, markiert den zeitlichen Beginn der Zerstörung der Passivschicht durch Lochfraß [78]. Folglich kann es zur Beurteilung der Korrosionsresistenz einer Legierung herangezogen werden. Denn so indiziert ein hohes Durchbruchpotential eine gute Korrosionsbeständigkeit [111]. Während die Durchbruchpotentiale der Edelmetalllegierungen, je nach Elektrolytlösung bei 1000 mV liegen, weisen NEM-Legierungen immer noch Durchbruchpotentiale zwischen 600-800 mV auf [78].

Die Durchbruchpotentiale (E_p-2) der vier untersuchten Legierungen liegen alle zwischen 750-900 mV, wobei die Durchbruchpotentiale in 0,1 M NaCl-Milchsäure tendenziell höher liegen.

Weiterhin zeigt sich, dass es durch das Zulegieren von weiteren Legierungselementen zu keiner merklichen Verbesserung kommt. Zusätzlich treten bei Legie-

rung Co-3 und Co-4, bei denen die Zulegierung durch eine Reduzierung des Chromgehalts erfolgte, weitere Durchbruchspotentiale (E_{p-1}) auf. Erschwerend kommt dabei hinzu, dass diese unterhalb 300 mV auftreten und sich somit im kritischen Potentialbereich befinden.

Passivbereich

Prinzipiell fällt auf, dass die „besseren“ Passivbereiche im Elektrolyt 0,1 M NaCl-Milchsäure zu finden sind, da diese bei niedrigeren Stromdichtewerten lokalisiert sind.

Der Passivbereich der Legierung Co-1, die lediglich Chrom enthält, weist in beiden Legierungen um eine Zehnerpotenz höhere Stromdichtewerte auf, als die der restlichen Legierungen. Folglich kann daraus geschlossen werden, dass das Zulegieren von Elementen eine Verschiebung des Passivbereichs zu niedrigeren Stromdichtewerten bewirkt und damit zu einer Verbesserung führt.

Auch bei in der Stahlmetallurgie durchgeführten Versuchen wurde die positive Wirkung von Legierungselementen auf den Passivbereich beobachtet. Denn so zeigte ferritischer Edelstahl, der Molybdän enthielt (30Cr-2Mo), in 1 M HCl eine um zwei Zehnerpotenzen niedrigere Passivstromdichte, als derselbe ferritische Edelstahl der kein Molybdän enthielt [115].

Um nun der Frage nachzugehen, ob die Passivierungsbereiche durch das Zulegieren von Wolfram oder durch das Zulegieren von Molybdän verbessert werden, ist es am naheliegendsten die beiden Legierungen Co-3 und Co-4 miteinander zu vergleichen, da sie den denselben PRE-Wert haben. Derselbe PRE-Wert kommt dadurch zustande, dass die Legierungen den gleichen Chromgehalt haben und nach der PRE-Formel der doppelte Wolframgehalt von Legierung Co-4 dem Molybdängehalt der Legierung Co-3 gleichzusetzen ist. Folglich müssten die Passivbereiche der Legierung Co-3 und Co-4 gleich sein. Bei Betrachtung der Passivbereiche dieser beiden Legierungen fällt jedoch auf, dass dies nicht ganz der Fall ist. Denn so führt Wolfram zu einer Verkürzung des Passivbereiches, was sich negativ auf das Korrosionsverhalten auswirkt, da ausgedehnte Passivbereiche eine gute Korrosionsbeständigkeit bewirken. Jedoch ver-

schiebt Wolfram den Passivbereich stärker zu niedrigeren Stromdichtewerten als Molybdän und verbessert somit die Korrosionsresistenz. Ähnliche Verschiebungen der Passivbereiche zu niedrigeren Stromdichten durch Wolfram wurden auch in einer von der Sektion Medizinische Werkstoffkunde und Technologie des Universitätsklinikum Tübingen durchgeführten Studie zum Einfluss von Molybdän und Wolfram auf das Korrosionsverhalten einer Kobalt-Chrom-Legierung, festgestellt [116].

Darüber hinaus zeigen die Messkurven, dass sich Wolfram noch in einem weiteren Punkt gegenüber Molybdän auszeichnet. Denn so kommt es im Elektrolyt 0,1 M NaCl-Milchsäure bei der Legierung Co4, bedingt durch den flacheren Stromdichteanstieg im Bereich von -100 mV bis +200 mV, nicht zur Ausbildung eines aktiven Peaks, wie das bei der molybdänhaltigen Legierung Co-3 der Fall ist.

Abschließend ist anzumerken, dass das Zulegieren von Wolfram, im Hinblick auf den Passivbereich, eine bessere Wirkung bringt, als das Zulegieren von Molybdän. Da jedoch der Passivbereich der Legierung Co-2 bei niedrigeren Stromdichtewerten lokalisiert ist, als der von Legierung Co-4, sollte das Zulegieren von Wolfram nicht zu Lasten des Chromgehaltes erfolgen.

Analytische Auswertung der Elektrolytlösung

Die analytischen Ergebnisse bestätigen, die bereits bei den Stromdichte-Potential-Kurven festgestellte Beobachtung, dass das Zulegieren von Elementen das Korrosionsverhalten wesentlich verbessert. Denn so sind die Ionenfreisetzungen der Legierungen Co-2, Co-3 und Co-4 in beiden Elektrolyten deutlich geringer, als die der Legierung Co-1. Folglich kann vermutet werden, dass sich mit dem Zulegieren des dritten Elements (Molybdän oder Wolfram) die Passivschicht dahingegen verändert, dass die Kobalt-Ionen gehindert werden diese zu verlassen.

Im Elektrolyt 0,1 M NaCl-Milchsäure werden etwas weniger Ionen freigesetzt als in 0,9 % NaCl. Dieses Ergebnis korreliert mit dem Verlauf der Stromdichte-Potential-Kurven der Legierungen Co-2, Co-3 und Co-4 in 0,1 M NaCl-

Milchsäure. Lediglich bei Legierung Co-1 stimmen die Ionenfreisetzungen nicht ganz mit den Kurvenverläufen überein. So werden im Elektrolyt 0,1 M NaCl-Milchsäure geringfügig mehr Ionen freigesetzt als in 0,9 % NaCl. Da die Versuche und die analytische Auswertung zeitversetzt vorgenommen wurden, kann eine mögliche Verwechslung der 0,9 % NaCl-Lösung und der 0,1 M NaCl-Milchsäurelösung ausgeschlossen werden. Daher kann vermutet werden, dass die überhöhte Ionenfreisetzung im Elektrolyten 0,1 M NaCl-Milchsäure durch eine herstellungsbedingte Gefügeveränderung hervorgerufen wurde.

Die Legierung mit der geringsten Ionenfreisetzung in beiden Elektrolyten ist die Legierung Co-2, gefolgt von der Legierung Co-4. Wie bereits geschildert, weisen diese Legierungen auch die „besseren“ Stromdichte-Potential-Kurven auf. Folglich bestätigt das analytische Ergebnis, die aus den Stromdichte-Potential-Kurven gewonnenen Erkenntnisse, dass Chrom das Legierungselement ist, welches am meisten zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit beiträgt und dass Wolfram die Korrosionsbeständigkeit besser beeinflusst als Molybdän.

Die analytische Auswertung zeigt, dass hauptsächlich Kobalt in Lösung geht. Dies ist zum einen dadurch bedingt, dass Kobalt bei allen vier Legierungen den höchsten Legierungsanteil hat. Zum anderen lässt sich dieses Phänomen auch erklären, wenn man die Stromdichte-Potential-Kurve von reinem Kobalt mit der einer Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierungen vergleicht. So zeigt sich nämlich, dass Kobalt, im Gegensatz zur Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierung, erst in einem höheren Potentialbereich eine Passivschicht ausbildet [117].

Zur Verifizierung der analytischen Ergebnisse wurden zum einen, die mittels des Faraday'schen Gesetzes berechneten Massenverluste für die Gesamtfläche, sowie die nach der Zonencoulometrie berechneten Massenverluste herangezogen.

Dabei zeigt sich, dass der berechnete Massenverlust für die gesamte Fläche deutlich größer ist, als der analytisch bestimmte Massenverlust. Ursache dafür ist, dass bei Berechnung des Massenverlusts die gesamte Fläche, die alle Legierungselemente beinhaltet, herangezogen wird, der analytische Massenver-

lust aber lediglich für das Element Kobalt gilt. Um daher eine realistischere Vergleichsgröße zu bekommen, wurde der berechnete Massenverlust für die gesamte Fläche auf den prozentualen Anteil des Legierungselementes reduziert. Durch diese Korrektur lassen sich nun die beiden Massenverluste ($\Delta m_{\text{Analytisch}}$ und Δm_{Anteil}) direkt miteinander vergleichen.

Wie aus der nachfolgenden Tabelle 8 hervorgeht, sind in sechs von acht Fällen die berechneten Massenverluste (Δm_{Anteil}) größer als die analytischen Massenverluste ($\Delta m_{\text{Analytisch}}$).

Tabelle 8: Vergleich Δm_{Anteil} mit $\Delta m_{\text{Analytisch}}$ in beiden Elektrolyten für das Element Kobalt

			0,1 M NaCl-Milchsäure		0,9 % NaCl	
			analytisch	berechnet	analytisch	berechnet
Co-1	Δm_{Anteil} Abweichung	$\mu\text{g}/\text{cm}^2$ %	261,99	271,44 3,6	249,8	343,11 37,4
Co-2	Δm_{Anteil} Abweichung	$\mu\text{g}/\text{cm}^2$ %	26,28	33,70 28,2	41,44	56,10 35,4
Co-3	Δm_{Anteil} Abweichung	$\mu\text{g}/\text{cm}^2$ %	59,01	61,44 4,1	93,35	110,08 17,9
Co-4	Δm_{Anteil} Abweichung	$\mu\text{g}/\text{cm}^2$ %	50,49	49,95 -1,1	59,98	55,54 -7,4

Da die Abweichung der berechneten Massenverlusten (Δm_{Anteil}) zu den analytischen Massenverlusten ($\Delta m_{\text{Analytisch}}$) lediglich +37,4 % bis -7,4 % beträgt, stimmen die analytischen Ergebnisse mit den berechneten Ergebnissen (Δm_{Anteil}) gut überein.

Ferner entspricht in fast allen Fällen die Summe aus den berechneten Massenverlusten von Zone I, II und III nach *Reclaru et al.* annähernd dem gesamten Massenverlust ($\Delta m_{\text{Ages.}}$). Folglich würde eine Umrechnung auf den Legierungsanteil auch zu einem ähnlichen Wert wie Δm_{Anteil} führen und somit auch $\Delta m_{\text{Analytisch}}$ annähernd entsprechen.

Vergleicht man Δm_{Q6} mit $\Delta m_{Ages.}$ fällt auf, dass in allen Fällen eine sehr große Differenz besteht. Dies ist dadurch bedingt, dass die Zone III nach *Maranche et al.* bereits bei einem Potential von 900 mV endet.

Während man bei den analytischen Massenverlusten und den berechneten Massenverlusten (Δm_{Anteil} und $\Delta m_{Ages.}$) lediglich eine Information über die Höhe des Massenverlusts bekommt, bietet die Zonencoulometrie nach *Reclaru et al.* und *Maranche et al.* den Vorteil, dass sie Auskunft geben, in welchem Potentialbereich der Massenverlust aufgetreten ist. Generell sollten dabei nach *Reclaru et al.* die Massenverluste v.a. in Zone I und ferner auch noch Zone II gering sein, da diese Zonen die klinisch relevanten Potentialbereiche beinhalten.

Bei allen Legierungen treten in beiden Elektrolyten in Zone I, verglichen zu den restlichen Zonen, die geringsten Massenverluste auf, was positiv zu werten ist. Wie bereits in Zone I, weisen die Legierungen Co-2, Co-3 und Co-4 auch in Zone II deutlich geringere Massenverluste als Legierung Co-1 auf und sind somit als besser einzustufen. Legierung Co-2 ist die beste Legierung, da sie den geringsten Massenverlust in beiden Zonen hat. Bei den Legierungen Co-3 und Co-4, die in beiden Zonen etwa doppelt so hohe Massenverluste wie Legierung Co-2 haben, ist Legierung Co-4 die Legierung mit dem geringeren Massenverlust. Hinsichtlich der Massenverluste in den beiden klinisch relevanten Zonen können die Legierungen daher folgendermaßen eingestuft werden: Co-2 < Co-4 < Co-3 < Co-1.

Die nachfolgenden Abbildung 67 verdeutlicht am Beispiel von Legierung Co-3 in 0,1 M NaCl-Milchsäure, dass mittels des Vergleichs von $\Delta m_{Q1,Q2,Q3}$ und Δm_{Q6} eine weitere Bewertung der Legierungen möglich ist. Ergibt sich nämlich eine große Differenz zwischen $\Delta m_{Q1,Q2,Q3}$ und Δm_{Q6} , ist dies ein Indiz dafür, dass die Legierung eine gute Korrosionsresistenz aufweist, da das Durchbruchpotential in einem hohen Potentialbereich bei einer niedrigen Stromdichte lokalisiert ist. Angewandt zeigt diese Bewertungsmöglichkeit, dass die Legierungen Co-2, Co-3 und Co-4 im Gegensatz zu Legierung Co-1 eine gute Korrosionsresistenz aufweisen.

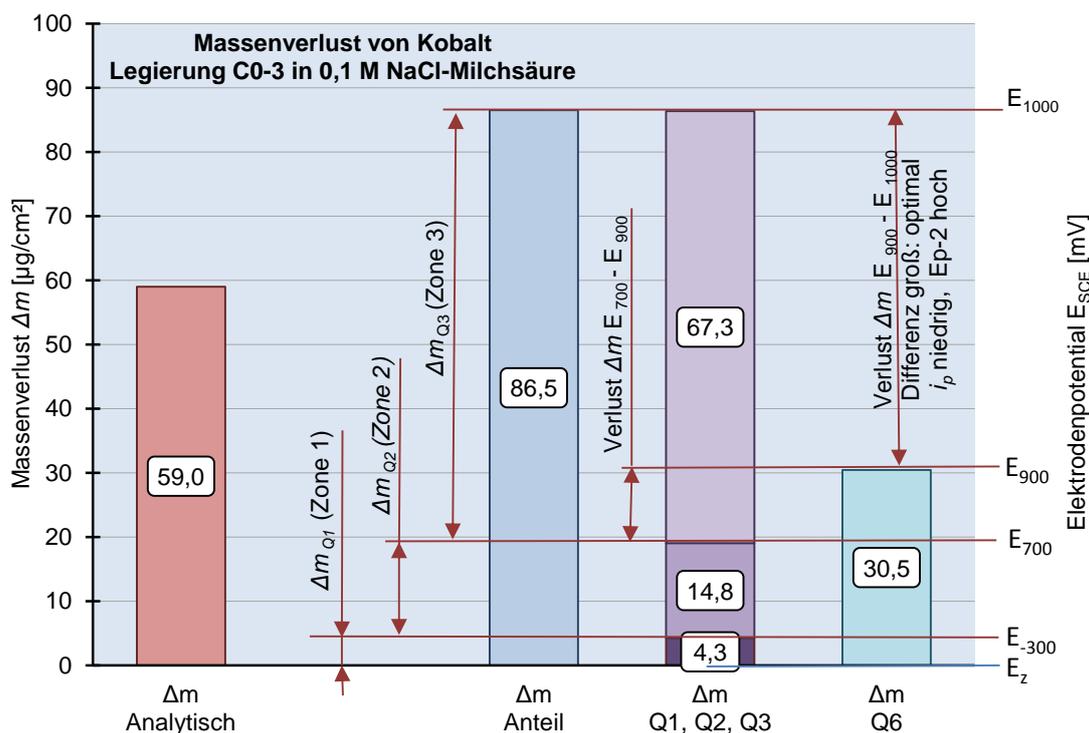


Abbildung 67: Vergleich von $\Delta m_{Q1,Q2,Q3}$ und Δm_{Q6} am Beispiel der Legierung Co-3 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

5.2.2 Diskussion der Ergebnisse des statischen Immersionstests

Auch wenn mittels des elektrochemischen Tests bereits eine Bewertung der untersuchten Legierungen hinsichtlich ihrer Korrosionsresistenz möglich ist, können Aussagen über das Langzeitkorrosionsverhalten nicht gemacht werden. Da jedoch Legierungen oft mehrere Jahre im Patientenmund verbleiben, ist die Untersuchung des Langzeitkorrosionsverhaltens von entscheidender Bedeutung. Um daher Aussagen über das zeitabhängige Korrosionsverhalten zu bekommen, wurde im Rahmen dieser Untersuchung zusätzlich ein statischer Immersionstest über eine Versuchsdauer von 42 Tagen durchgeführt.

Betrachtet man das Langzeitkorrosionsverhalten von Legierungen, so lassen sich Legierungen gemäß ISO 10271:2001 (E) [118] in drei Kategorien einteilen:

- Legierungen mit abfallender Korrosionsrate (Typ I)
- Legierungen mit stagnierender Korrosionsrate (Typ II)
- Legierungen mit ansteigender Korrosionsrate (Typ III)

Die nachfolgende Abbildung 68 verdeutlicht nochmals schematisch diese Einteilung.

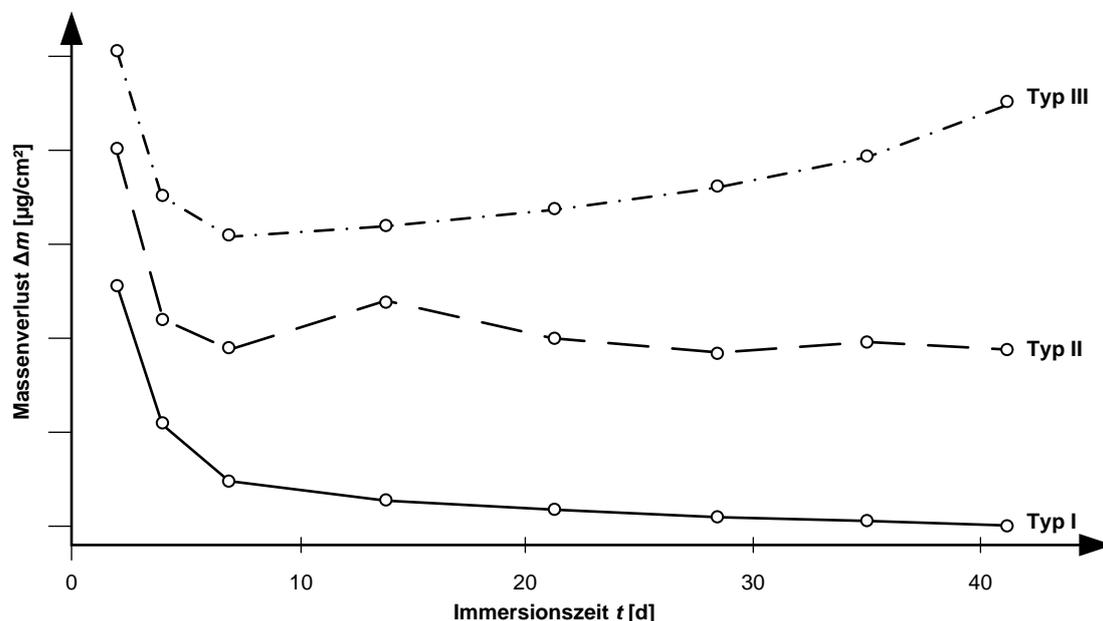


Abbildung 68: Schema der Kurvenverläufe der drei Legierungstypen (Typ I, II und III) in Anlehnung an ISO 10271:2001 (E) [118]

Nach ISO 10271:2001 (E) [118] sind Legierungen, die eine abfallende Korrosionsrate aufweisen, am besten einzustufen, da es bei diesen zur Ausbildung einer Passivschicht gekommen ist. Während Legierungen mit stagnierender Korrosionsrate nur bei einer niedrigeren Korrosionsrate ($28,6 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ Massenverlust pro Tag) akzeptable sind, müssen Legierungen mit ansteigender Korrosionsrate abgelehnt werden.

Alle untersuchten Legierungen zeigen in der graphischen Darstellung der analytischen Ergebnisse einen Kurvenverlauf, der dem von Typ I der Abbildung 68 annähernd entspricht. Folglich weisen alle Legierungen ein gutes Korrosionsverhalten auf, da es zur Ausbildung einer Passivschicht gekommen ist. Darüber hinaus erfüllen die Legierungen auch die Anforderung der DIN EN ISO 22674:2006 [119], da sie alle deutlich unter dem in der Norm geforderten maximalen Grenzwert von $200 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ pro 7 Tage liegen.

Dennoch unterscheiden sich die Legierungen bezüglich ihres Korrosionsverhaltens.

Zunächst jedoch ist allen Legierungen gemeinsam, dass sie die größten Massenverluste in den ersten drei Einlagerungsperioden zu verzeichnen haben. Dies ist dadurch bedingt, dass es noch nicht zur Ausbildung einer schützenden Passivschicht gekommen ist. Ferner findet in den ersten sieben Tagen ein häufigerer Wechsel in eine frische Lösung statt, so dass durch die ständig vorherrschenden Konzentrationsunterschiede vermehrt Ionen in Lösung gehen.

Jedoch unterscheiden sich die Legierungen in der Höhe ihrer Gesamtmassenverluste.

Die mit Abstand beste Korrosionsresistenz weist Legierung Co-4 auf, da sie den geringsten Massenverlust zu verzeichnen hat. Ferner hat sich nach sieben Tagen ihre Passivschichtbildung soweit stabilisiert, dass sich bis zum 42. Tag der aufsummierte Gesamtmassenverlust nur noch um ca. 20 % erhöht. Da darüber hinaus bereits nach 35 Tagen der Massenverlust unter die Nachweisgrenze fällt, kann davon ausgegangen werden, dass es auch bei einer längeren Versuchsdauer zu keinen weiteren Massenverlusten gekommen wäre.

Die zweitbeste Korrosionsresistenz weist die Legierung Co-2 auf. Während sie in der ersten Einlagerungsperiode noch geringere Massenverluste als Legierung Co-4 aufweist, liegt der aufsummierte Gesamtmassenverlust am Versuchsende etwa doppelt so hoch wie der von Legierung Co-4. Selbst nach Ablauf der 42 Tage beobachtete man bei der Legierung noch einen leichten Anstieg des aufsummierten Gesamtmassenverlustes, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Passivschichtbildung noch nicht vollständig abgeschlossen ist.

Die Legierung Co-1 zeigt ein schlechteres Ergebnis als Legierung Co-2, da die aufsummierten Gesamtmassenverluste ca. 25% höher sind. Darüber hinaus ist negativ zu werten, dass in der letzten Einlagerungsperiode die Korrosionsrate ansteigt. Dies deutet darauf hin, dass die Passivschicht wieder durchlässiger geworden ist.

Die schlechteste Legierung ist Legierung Co-3, da sie im statischen Immersionstest den höchsten Gesamtmassenverlust hat. Ursächlich hierfür ist v.a. der initial sehr hohen Massenverlust in den ersten drei Einlagerungsperioden.

Die nachfolgende Abbildung 69 veranschaulicht nochmals das bereits Geschilderte. Darüber hinaus wird ersichtlich, wie sich das Zulegieren von Molybdän oder Wolfram auf das Korrosionsverhalten der Legierungen auswirkt. So bringt die Reduktion des Kobaltgehaltes durch das Zulegieren von Wolfram eine Verbesserung, wie der Vergleich der Legierungen Co-1 und Co-2 zeigt. Vergleicht man die Massenverluste von Legierung Co-2 mit denen von Legierung Co-4, so fällt auf, dass ein noch höherer Wolframgehalt unter Substitution eines Chromanteils zu einer zusätzlichen Reduktion der Masseverluste führt und dazu beiträgt, dass Chrom nicht so stark in Lösung geht. Die teilweise Substitution des Chromgehaltes durch Molybdän bewirkt bei Legierung Co-3 ebenfalls, dass Chrom vermindert in Lösung geht. Jedoch gehen bei Legierung Co-3 verstärkt Kobalt und Molybdän in Lösung, so dass letztendlich Legierung Co-3, aufgrund des höchsten Massenverlustes, das schlechteste Ergebnis von allen Legierung aufweist. Somit hat das Zulegieren von Molybdän keine Verbesserung gebracht und die in der Literatur beschriebene Säurebeständigkeit hat sich nicht bestätigt [114], [38].

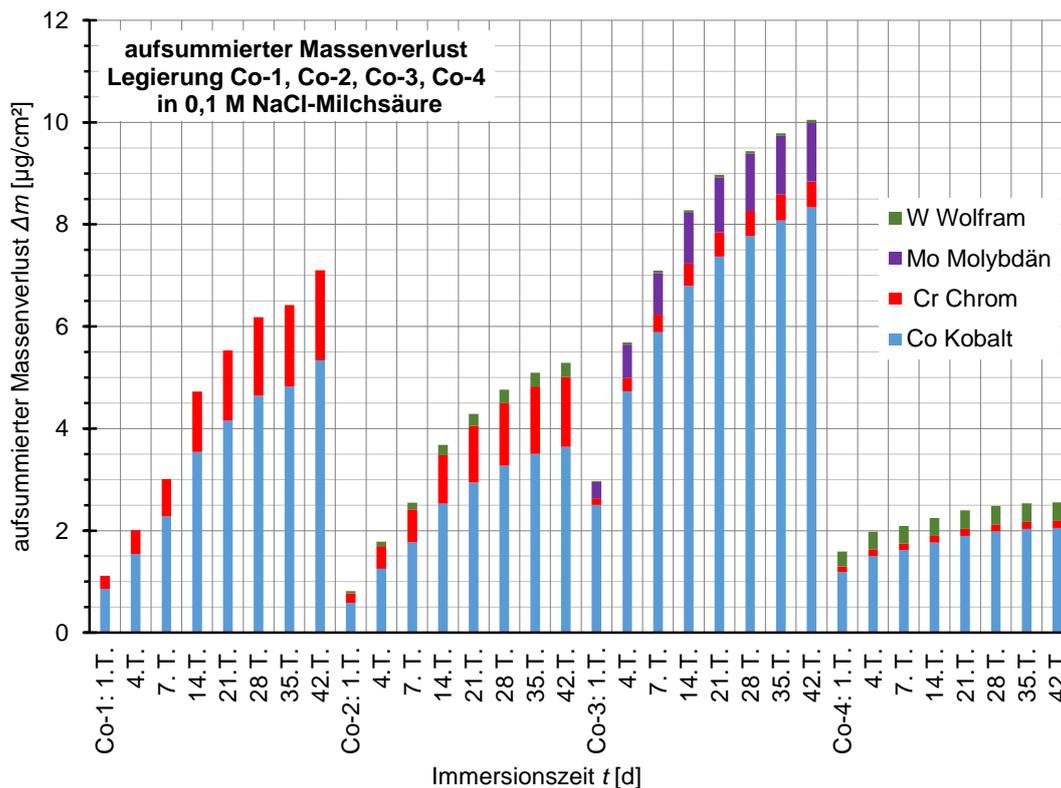


Abbildung 69: Gegenüberstellung der Massenverluste der vier untersuchten Legierungen in 0,1 M NaCl-Milchsäure

5.2.3 Vergleich der Ergebnisse des statischen Immersionstest mit den Ergebnissen des elektrochemischen Tests

Beim elektrochemischen Test und beim statischen Immersionstest kam derselbe Elektrolyt (0,1 M NaCl-Milchsäure) zum Einsatz. Folglich müssten die analytischen Ergebnisse der beiden Tests übereinstimmen.

Allerdings zeigt der Vergleich der analytischen Ergebnisse, dass keine Korrelation vorliegt. Denn so zeigte im elektrochemischen Test Legierung Co-2, gefolgt von Legierung Co-4, Co-3 und Co-1 die geringsten Massenverluste. Im statischen Immersionstest wies Legierung Co-4, gefolgt von Legierung Co-2, Co-1 und Co-3 den geringsten Massenverlust auf. Ferner waren im elektrochemischen Test insgesamt wesentlich höhere Massenverluste zu verzeichnen.

Für die unterschiedlichen Ergebnisse können mehrere Ursachen verantwortlich sein.

So können beim Herstellen der Prüfkörper durch unterschiedliche Abgussgrößen und damit verbundenen unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten ver-

schiedene Probengefüge entstehen [120], was wiederum zu einem unterschiedlichen Korrosionsverhalten führen kann.

Sicherlich ein Grund für die abweichenden Ergebnisse ist, dass die im statischen Immersionstest angewendeten Prüfkörper deutlich größer waren, als die des elektrochemischen Tests. Folglich war es, wie bereits im Abschnitt 5.1 erwähnt, schwieriger diese gleichmäßig zu polieren. Dadurch resultierten eventuell unterschiedliche Rautiefen, was wiederum zu einem unterschiedlichen Korrosionsverhalten führen kann.

Weiterhin können auch die unterschiedlichen Verhältnisse der Prüfkörperoberflächen zum Volumen der eingesetzten Elektrolytlösung mitverantwortlich sein für die abweichenden Ergebnisse der beiden Tests. Während im elektrochemischen Test 100 ml Elektrolytlösung pro Prüfkörper zum Einsatz kamen, waren es im statischen Immersionstest lediglich 10 ml. Somit betrug beim elektrochemischen Test das Verhältnis von eingesetztem Volumen zur Prüfkörperoberfläche 128,2 ml pro 1 cm², während es im statischen Immersionstest lediglich 1,3 ml pro 1 cm² betrug.

Ferner ist zu bedenken, dass für die beiden Tests jeweils separate Elektrolytflüssigkeiten angemischt wurden. Zwar handelte es sich hierbei um dieselbe Elektrolytflüssigkeit, jedoch sind durch das manuelle Anmischen mischungsbedingte Unterschiede in der Zusammensetzung unvermeidbar.

Abschließend muss auch erwähnt werden, dass abweichende Ergebnisse in den beiden Tests auch dadurch bedingt sind, dass im elektrochemischen Test die Korrosion, durch Anlegen einer Spannung, forciert herbeigeführt wurde.

5.2.4 Vergleich der Ergebnisse in Bezug auf den PRE-Wert

Die Legierungen Co-3 und Co-4 haben den gleichen PRE-Wert und müssten somit eine ähnliche Korrosionsresistenz aufweisen. Allerdings sind gerade im statischen Immersionstest bei Legierung Co-3 die Massenverluste deutlich größer. Es lässt sich daher vermuten, dass bei Legierung Co-3 eine Verunreinigung vorliegen kann.

Verunreinigungen im Gefüge treten vornehmlich an den Korngrenzen auf und haben ihre Ursache in mangelnder Reinheit der Legierungsanteile oder Fehler

bei der Verarbeitung. Korngrenzenfehler stellen dabei Angriffspunkte für alle Korrosionsarten dar [121], [122]. Unter den nichtmetallischen Verunreinigungen können besonders Schwefel (S) und Phosphor (P) Probleme verursachen. So bildet z.B. Schwefel (S) zusammen mit Mangan (Mn) – hier mit 0,5 % Legierungsanteil in allen vier Legierungen enthalten – Mangansulfide, die die Korrosionsbeständigkeit drastisch senken [121].

Da man auf Mangan zur Verbesserung der Gießbarkeit, Festigkeit und Bearbeitbarkeit nicht verzichten kann, ist die Korrosionsbeständigkeit primär vom Schwefelgehalt abhängig, der wie auch der Phosphorgehalt somit so niedrig wie möglich gehalten werden muss [121].

Daher kann an dieser Stelle die Frage aufgeworfen werden, ob eigentlich Schwefel und Phosphor mit in die PRE-Formel aufgenommen werden sollten und zwar mit einem großen negativen Faktor, um die ausgesprochen nachteilige Wirkung von Schwefel wiederzugeben. Gerade die Höhe dieses Faktors wurde vielfach diskutiert und es wurde vorgeschlagen Schwefel und Phosphor mit einem negativen Faktor von 123 in die PRE-Formel einfließen zu lassen, so dass sich dann die modifizierte Formel:

$$\text{PRE} = \text{Cr} + 3,3 \times (\text{Mo} + 0,5 \text{ W}) - 123 \times (\text{S} + \text{P})$$

ergibt [123].

Aus der Formel wird ersichtlich, dass bereits eine Verunreinigung von knapp 0,01 Gewichtsprozent den PRE-Wert um den Wert 1 vermindert.

5.2.5 Klinische Schlussfolgerung

Grundsätzlich können alle vier untersuchten Legierungen zunächst für den klinischen Einsatz empfohlen werden, da alle Legierungen ihr Durchbruchspotential oberhalb von 300 mV bzw. 500 mV haben.

Will man jedoch eine Bewertung der Legierungen bezüglich ihrer Ionenabgabe machen, so ergeben sich Probleme, da die analytischen Ergebnisse des statischen Immersionstest nicht mit denen des elektrochemischen Tests korrelieren. Da allerdings die analytischen Ergebnisse des elektrochemischen Tests gut mit

den Kurvenverläufen übereinstimmen, können die Ergebnisse des elektrochemischen Tests etwas stärker gewichtet werden, als die des statischen Immersionstests.

Im statischen Immersionstest erfüllen alle Legierungen die Anforderung der DIN EN ISO 22674:2006 [119], da ihre Massenverluste deutlich unter dem in der Norm geforderten maximalen Grenzwert von $200 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ liegen.

Allerdings ist zu beachten, dass sich die ermittelten Massenverluste allein auf die tatsächlich in Lösung gegangenen Ionen stützen. Da jedoch die gebildeten Korrosionsprodukte nicht zwangsläufig gelöst im Untersuchungsmedium vorliegen, sondern fest an der Oberfläche der Prüfkörper haften, wird ein Teil der Korrosionsprodukte nicht berücksichtigt [103]. Folglich fallen die Massenverluste geringer aus, als sie tatsächlich sind.

Im elektrochemischen Test weisen die untersuchten Legierungen deutlich höhere Massenverluste auf, als im statischen Immersionstest. Würde man allerdings den für den statischen Immersionstest herausgegeben Grenzwert auch für die Bewertung der analytischen Ergebnisse des elektrochemischen Tests heranziehen, so würden die Massenverluste der Legierungen Co-2, Co-3 und Co-4 dennoch unter dem erlaubten Grenzwert liegen. Legierung Co-1 würde jedoch für den klinischen Einsatz nicht in Frage kommen, da ihr Massenverlust oberhalb des erlaubten Grenzwertes liegen würde.

Während die Legierungen Co-2 und Co-4 in beiden Tests gute analytische Ergebnisse aufweisen, muss die Legierung Co-3 kritischer betrachtet werden.

Im statischen Immersionstest weist die Legierung Co-3 anfänglich eine sehr hohe Ionenabgabe auf. Folglich kann vermutet werden, dass Zahnersatz, der aus dieser Legierung hergestellt ist, in den ersten Tagen nach der Eingliederung vermehrt zu Metallgeschmack und Irritationen führt [11].

Berücksichtigt man die analytischen Ergebnisse aus beiden Tests, so kann abschließend gesagt werden, dass die Legierungen Co-2 und Co-4 für den klinischen Einsatz unbedenklich sind, während der Einsatz der Legierungen Co-1 und Co-3 eher kritisch bewertet werden muss.

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss von Molybdän und Wolfram auf das Korrosionsverhalten zweier experimenteller Kobalt-Chrom-Legierungen mit unterschiedlichem Chromgehalt untersucht. Als Untersuchungsmethoden kamen der elektrochemische Test (potentiodynamische Polarisation) sowie der statische Immersionstest, der über einen Zeitraum von 42 Tagen durchgeführt wurde, zum Einsatz. Beide Versuche wurden in Anlehnung an DIN EN ISO 10271:2011 [47] durchgeführt. Während beim elektrochemischen Test zwei verschiedene Elektrolyte (0,1 M NaCl-Milchsäure und 0,9 % NaCl) verwendet wurden, kam beim statischen Immersionstest lediglich der Elektrolyt 0,1 M NaCl-Milchsäure zum Einsatz. Bei beiden Versuchen erfolgte eine analytische Auswertung der korrosiv kontaminierten Prüflösung mittels ICP-OES. Zur Verifizierung der analytischen Ergebnisse wurden beim elektrochemischen Test die mittels des Faraday'schen Gesetzes berechneten Massenverluste, sowie die nach der Zonencoulometrie berechneten Massenverluste herangezogen.

Beim elektrochemischen Test waren die Ergebnisse in 0,1 M NaCl-Milchsäure generell „besser“ als in 0,9 % NaCl, da positivere Ruhepotentialwerte vorlagen, die Durchbruchpotentiale bei höheren Potentialwerten zu finden waren und die Passivbereiche in einem niedrigeren Stromdichteniveau lokalisiert waren. Positiv konnte gewertet werden, dass die Durchbruchpotentiale aller Legierungen oberhalb der im Mund vorkommenden Potentiale (300 mV bzw. 500 mV) lagen. Allerdings hatten alle Legierungen ihren Passivbereich bei einer Korrosionsstromdichte, die größer war als die tolerierbare Korrosionsstromdichte von 10^{-5} A/cm². Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass man durch das Zulegieren von Elementen eine Verschiebung der Passivbereiche zu niedrigeren Stromdichtewerten erreichen kann. Den Passivierungsbereich mit den niedrigsten Stromdichtewerten erreichte man dabei durch das Zulegieren von Wolfram unter Beibehaltung des hohen Chromanteils. Ferner konnte gezeigt werden, dass auch Molybdän den Passivbereich modifizieren kann. Denn so führte Molybdän im Vergleich zu Wolfram nicht nur zu längeren Passivbereichen, sondern be-

wirkte auch, dass die Passivbereiche konstantere Stromdichtewerte aufwiesen. Allerdings war bei der molybdänhaltigen Legierung Co-3 der Passivbereiche bei höheren Stromdichtewerten lokalisiert als bei der wolframhaltigen Legierung Co-4. Da ferner die Legierung Co-4 im Gegensatz zur Legierung Co-3 keinen aktiven Peak aufwies, brachte das Zulegieren von Wolfram eine etwas bessere Wirkung als das Zulegieren von Molybdän. Das Zulegieren von Wolfram oder Molybdän sollte jedoch nicht auf Kosten des Chromgehaltes erfolgen, da sonst mit dem Auftreten weiterer Durchbruchspotentiale zu rechnen ist, wie dies im Falle der Legierung Co-3 und Co-4 zu beobachten war.

Bei der analytischen Auswertung des elektrochemischen Tests ergaben sich die geringsten Ionenfreisetzungen für die Legierung Co-2, gefolgt von der Legierung Co-4, Co-3 und Co-1. Somit bestätigte sich, die bereits bei den Stromdichte-Potential-Kurven gewonnene Erkenntnis, dass das Zulegieren von Elementen das Korrosionsverhalten verbessert. Ferner zeigte sich, dass durch das Zulegieren von Wolfram oder Molybdän auch ein Chromanteil von nur 20 Gewichtsprozent ausreichend ist, um gute Ergebnisse zu erzielen. Die mittels des Faraday'schen Gesetzes berechneten Massenverluste zeigten, nachdem sie auf den prozentualen Legierungsanteil reduziert wurden, eine gute Übereinstimmung mit den analytisch bestimmten Massenverlusten. Bei den, in Anlehnung an Reclaru et al., mittels der Zonencoulometrie berechneten Massenverlusten, hatte die Legierung Co-2, gefolgt von der Legierung Co-4, Co-3 und Co-1 die geringsten Massenverluste in den klinisch relevanten Zonen.

Die analytische Auswertung des statischen Immersionstest ergab keine Korrelation mit den analytischen Ergebnissen des elektrochemischen Tests. Denn so zeigten im statischen Immersionstest die Legierung Co-4, gefolgt von Legierung Co-2, Co-1 und Co-3 die geringsten Ionenfreisetzungen. Ferner vielen die Ionenfreisetzungen deutlich geringer aus, als im elektrochemischen Test. Im statischen Immersionstest erfüllten alle Legierungen die Anforderung der DIN EN ISO 22674:2006 [119] da ihre Massenverluste deutlich unter dem in der Norm geforderten maximalen Grenzwert von 200 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ lagen.

Literaturverzeichnis

- [1] Geis-Gerstorfer, J., Rupp, F. und Scheideler, L. *Korrosionsprüfung - eine wichtige Basis für die Materialauswahl*. Quintessenz Zahntech. 31/12, 2005. S. 1343-1348.
- [2] Weber, H. *Zum Korrosionsverhalten dentaler Legierungen*. Dtsch Zahnärztl Z. 40, 1985. S. 254-260.
- [3] Herrmann, D. *Biokompatibilität dentaler Legierungen*. Dtsch Zahnärztl Z. 40, 1985. S. 261-265.
- [4] Smith, D.C. und Williams, D.F. *Biocompatibility of Dental Materials Vol I*. Boca Raton, FloridaCRC Press, 1982.
- [5] Kappert, H.F. und Eichner, K. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2 Werkstoffe unter klinischen Aspekten - 6. vollständige überarbeitete und erweiterte Auflage*. StuttgartGeorg Thieme Verlag, 2008. S. 65.
- [6] Rahm, E., et al. *Corrosion-stable nickel- and cobalt-based alloys for dental applications*. Microchim Acta 156, 2007. S. 141-145.
- [7] Brauner, H. und Thull, R. *Quantifizierung der durch Reibung induzierten Korrosion an Nichtedelmetall-Dentallegierungen*. Dtsch Zahnärztl Z. 44, 1989. S. 441-443.
- [8] Klötzer, W.T. *Biologische Aspekte der Korrosion*. Dtsch Zahnärztl Z. 40, 1985. S. 1141-1145.
- [9] Kratzenstein, B., et al. *In-vivo-Korrosionsuntersuchungen an kieferorthopädischen Apparaten*. Dtsch Zahnärztl Z. 40, 1985. S. 1146-1150.
- [10] Kappert, H.F. und Eichner, K. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2 Werkstoffe unter klinischen Aspekten - 6. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage*. Stuttgart; Georg Thieme Verlag, 2008. S. 37.
- [11] Opydo, W. und Opydo-Szymaczek, J. *Metallic dental materials in patient's oral cavity acting as electrodes of electrochemical cells*. Materials and Corrosion 55/7, 2004. S. 520-523.

- [12] Battaini, P. und Viscardi, M. *Messung und Vermeidung der elektrochemischen Korrosion von Dentallegierungen*. Quintessenz Zahntech. 21, 1995. S. 1029-1037.
- [13] Siebert, G.K. *Dentallegierungen in der zahnärztlichen Prothetik*. München: Carl Hanser Verlag, 1989. S. 56.
- [14] Manaranche, C. und Hornberger, H. *A proposal for the classification of dental alloys according to their resistance to corrosion*. Dent Mater. 23/11, 2007. S. 1428-1437.
- [15] Eichner, K. und Kappert, H.F. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 1 Grundlagen und Verarbeitung - 6. neubearbeitete und erweiterte Auflage*. München: Hüthig, 1996. S. 136-137.
- [16] Heppt, W. und Bachert, C. *Praktische Allergologie - 2. vollständig überarbeitete Auflage*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2011. S. 118.
- [17] Eichner, K. und Kappert, H.F. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 1 Grundlagen und Verarbeitung - 6. neubearbeitete und erweiterte Auflage*. München: Hüthig, 1996. S. 137.
- [18] Menne, T. und Burrows, D. *Contact sensitizations to nickel, chromate and cobalt*. Chicago Proceedings of the Workshop on biocompatibility of metals in dentistry, 1984. S. 79.
- [19] Strietzel, R. *Die Werkstoffkunde der Metall-Keramik-Systeme - 1. Auflage*. München: Verlag Neuer Merkur, 2005. S. 49.
- [20] Strub, J.R., et al. *Curriculum Prothetik Band II - 4. überarbeitete und erweiterte Auflage*. Berlin: Quintessenz Verlag, 2011. S. 464.
- [21] Eichner, K. und Kappert, H.F. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 1 Grundlagen und ihre Verarbeitung - 8. unveränderte Auflage*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2005. S. 92.
- [22] *Das Dental Vademekum - 10. Ausgabe*. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag, 2009/2010. S. 721-860.
- [23] Rau, G. und Ströbel, R. *Die Metalle in der Zahntechnik - 16. Völlig überarbeitete Auflage*. München: Verlag Neuer Merkur, 1992. S. 149.
- [24] Strub, J.R., et al. *Curriculum Prothetik Band II - 4. überarbeitete und erweiterte Auflage*. Berlin: Quintessenz Verlag, 2011. S. 467.

- [25] Rau, G. und Ströbel, R. *Die Metalle in der Zahntechnik - 16. völlig überarbeitete Auflage*. München: Verlag Neuer Merkur, 1992. S. 174.
- [26] Eichner, K. und Kappert, H.F. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 1 Grundlagen und Verarbeitung - 6. neubearbeitete und erweiterte Auflage*. München: Hüthig, 1996. S. 121.
- [27] —. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 1 Grundlagen und Verarbeitung - 6. neubearbeitete und erweiterte Auflage*. München: Hüthig, 1996. S. 119.
- [28] Kappert, H.F. und Eichner, F. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2 Werkstoffe unter klinischen Aspekten - 6. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2008. S. 66.
- [29] Reclaru, L., et al. *Corrosion behaviour of cobalt-chromium dental alloys doped with precious metals*. *Biomaterials*. 26, 2005. S. 4358-4365.
- [30] Anusavice, K.J. *Phillips`science of dental materials - 11th ed*. London: Saunders, 2003. S. 594.
- [31] Lindigkeit, J. *Mehr als Billiglösung für die soziale Indikation - Edelmetallfreie Legierungen und Titan*. *DZW-Spezial 1-2*, 2002. S. 20-23.
- [32] Wirz, J. *Corrosion behavior of cobalt based alloys for crowns and bridgework*. *Quintessenz* 39, 1988. S. 1997-2008.
- [33] Sharma, M., et al. *Electrochemical Corrosion Behavior of Dental/Implant Alloys in Artificial Saliva*. *Journal of Materials Engineering and Performance* 17/5, 2008. S. 695-701.
- [34] Wirz, J., et al. *Fired alloys in the crevice corrosion test*. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 97, 1987. S. 571-590.
- [35] Strub, J.R., et al. *Curriculum Prothetik Band II - 4. überarbeitete und erweiterte Auflage*. Berlin: Quintessenz Verlag, 2011. S. 468.
- [36] Eichner, K. und Kappert, H.F. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 1 Grundlagen und Verarbeitung - 6. neubearbeitete und erweiterte Auflage*. München: Hüthig, 1996. S. 130.
- [37] Siebert, G.K. *Dentallegierungen in der zahnärztlichen Prothetik*. München: Carl Hanser Verlag, 1989. S. 35.

- [38] Strietzel, R. *Eine Erfolgsgeschichte - Die EMF-Legierung Wirobond von Bego feiert 30-jähriges Jubiläum*. dental dialogue 41, 2013. S. 40-50.
- [39] Siebert, G.K. *Dentallegierungen in der zahnärztlichen Prothetik*. München: Carl HanserVerlag, 1989. S. 60-61.
- [40] Strub, J.R., et al. *Curriculum Prothetik Band III - 4. überarbeitete und erweiterte Auflage*. Berlin: Quintessenz Verlag, 2011. S. 746.
- [41] Strub, J.R., et al. *Curriculum Prothetik Band II - 4. überarbeitete und erweiterte Auflage*. Berlin: Quintessenz Verlag, 2011. S. 746.
- [42] Lucas, L.C., et al. *In vitro vs. In vivo corrosion analyses of two alloys*. J Invest Surg. 4/1, 1991. S. 13-21.
- [43] Geis-Gerstorfer, J., Sauer, K.H. und Passler, K. *Ion release from Ni-Cr-Mo and Co-Cr-Mo casting alloys*. Int J Prosthodont. 4/2, 1991. S. 152-158.
- [44] Grimido, N.J. *Biocompatibility of nickel and cobalt dental alloys*. Gen Dent. 49/5, 2001. S. 504-505.
- [45] Dong, H., et al. *Corrosion behavior of dental alloys in various types of electrolyzed water*. Dent Mater J. 22/4, 2003. S. 482-493.
- [46] Rinic, N., et al. *Corrosion behavior of the Co-Cr-Mo dental alloy in solutions of different composition and different pH values*. Coll Antropol. 27/2, 2003. S. 99-106.
- [47] DIN Deutsches Institut für Normung. *DIN-Taschenbuch 267/1 "Zahnheilkunde 1 - Werkstoffe - 3. Auflage*. Berlin: Beuth Verlag, 2013. S. 436-470.
- [48] Tostmann, K.H. *Korrosion: Ursachen und Vermeidung*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2001. S. 22.
- [49] Seidel, W. *Werkstofftechnik: Werkstoffe-Eigenschaften-Prüfungen-Anwendungen - 4. durchgesehene Auflage*. München/Wien: Carl Hanser Verlag, 2000. S. 242.
- [50] Gobrecht, J. *Werkstofftechnik-Metalle - 2. Auflage*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2006. S. 272.

- [51] Kappert, H.F. und Eichner, K. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2 Werkstoffe unter klinischen Aspekten - 6. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2008. S. 8.
- [52] —. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2 Werkstoffe unter klinischen Aspekten - 6. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2008. S. 38-39.
- [53] Zukunft, D. *Spezielle Metallkunde für Zahntechniker - 3. überarbeitete Auflage*. Berlin: Ullstein Mosby, 1993. S. 166.
- [54] Wirz, J. und Steinemann, S. *The corrosion process in the mouth*. Phillip J Restaur Zahnmed. 4, 1987. S. 81-85.
- [55] Ross, E. und Maile, K. *Werkstoffkunde für Ingenieure - 2. neu bearbeitete Auflage*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. S. 340.
- [56] Schmidt, R. *Werkstoffverhalten in biologischen Systemen - 2. Auflage*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. S. 84.
- [57] Marxkors, R. und Meiners, H. *Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde - 5. überarbeitete und ergänzte Auflage*. Köln/München: Deutscher Zahnärzte Verlag DÄV-Hanser, 2001. S. 230-231.
- [58] Kappert, H.F. und Eichner, K. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2 Werkstoffe unter klinischen Aspekten - 6. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2008. S. 41.
- [59] Strietzel, R. *Korrodiert Du noch - oder löst Du Dich schon auf?* Quintessenz Zahntech. 38/12, 2012. S. 1551-1554.
- [60] Marxkors, R. und Meiners, H. *Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde - 5. überarbeitete und ergänzte Auflage*. Köln/München: Deutscher Zahnärzte Verlag DÄV-Hanser, 2001. S. 231-232.
- [61] Lehmann, K.M., Hellwig, E. und Wenz, H.J. *Zahnärztliche Propädeutik - 12. vollständige überarbeitete und erweiterte Auflage*. Köln/ München: Deutscher Zahnärzte Verlag DÄV-Hanser, 2012. S. 55.
- [62] Strietzel, R. *Die Batterie im Mund - Fakt oder Mythos?* Quintessenz Zahntech. 37/12, 2011. S. 1665-1668.

- [63] Lulmburg, A., Kutilin, A. und Hochortler, G. *Corrosion of non-precious metal alloys*. ZWR. 95, 1986. S. 544-550.
- [64] Worch, H., Pompe, W. und Schatt, W. *Werkstoffwissenschaft - 10. vollständig überarbeitete Auflage*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2011. S. 337.
- [65] Roos, E. und Maile, K. *Werkstoffkunde für Ingenieure*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. S. 344.
- [66] Seidel, W. *Werkstofftechnik: Werkstoffe-Eigenschaften-Prüfungen-Anwendungen - 4. durchgesehene Auflage*. München/Wien: Carl Hanser Verlag, 2000. S. 247-248.
- [67] Roos, E. und Maile, K. *Werkstoffkunde für Ingenieure*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. S. 349.
- [68] Meyer, E. *Current opinion on the incorporation of various metals in the oral cavity*. Dtsch Zahnärztl Z. 36/4 , 1981. S. 265-269.
- [69] Weber, H. *Edelmetallfreie (NEM) Kronen-, Brücken- und Geschiebeprothetik*. Berlin: Quintessenz Verlag, 1985. S. 167.
- [70] Kappert, H.F. und Eichner, K. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2 Werkstoffe unter klinischen Aspekten - 6. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2008. S. 48.
- [71] Bergmann, W. *Werkstofftechnik 2: Werkstoffherstellung-Werkstoffverarbeitung-Werkstoffanwendung - 4. aktualisierte Auflage*. München: Carl Hanser Verlag, 2009.
- [72] Es-Souni, M., Fischer-Brandies, H. und Es-Souni, M. *On the In Vitro Biocompatibility of Elgiloy, a Co-based Alloy, Compared to Two Titanium Alloys*. J Orofac Orthop 64, 2003. S. 16-26.
- [73] Gümpel, P. *Rostfreie Stähle: Grundwissen, Konstruktions- und Verarbeitungshinweise - 4. völlig neu bearbeitete Auflage*. Renningen: expert Verlag, 2008. S. 71.
- [74] Winston Revie, R. *Uhlig's corrosion handbook -3rd ed*. New Jersey: Wiley, 2011. S. 152.

- [75] Kappert, H.F. und Eichner, K. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2 Werkstoffe unter klinischen Aspekten - vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage.* Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2008. S. 64.
- [76] Reclaru, L. und Meyer, J.M. *Zonal coulometric analysis of the corrosion resistance of dental alloys.* J Dent. 23/5, 1995. S. 301-311.
- [77] Kappert, H.F. und Eichner, K. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2 Werkstoffe unter klinischen Aspekten - 6. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage.* Stuttgart: Georg Thieme Verlag. S. 59.
- [78] —. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2 Werkstoffe unter klinischen Aspekten - 6. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage.* Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2008. S. 61.
- [79] Roos, E. und Maile, K. *Werkstoffkunde für Ingenieure.* Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. S. 362.
- [80] Schmidt, R. *Werkstoffverhalten in biologischen Systemen - 2. Auflage.* Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. S. 90.
- [81] Roos, E. und Maile, K. *Werkstoffkunde für Ingenieure - 2. Auflage.* Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. S. 339.
- [82] Khamis, E. und Seddik, M. *Corrosion evaluation of recasting non-precious dental alloys.* [Hrsg.] Int Dent 45 J. 1995. S. 209-217.
- [83] Schwickerath, H., Pfeifer, K. und Nachtweyh, K. *Löslichkeit von Edelmetalllegierungen nach Mehrfachguß.* Dtsch Zahnärztl Z. 53, 1998. S. 215-218.
- [84] Borowski, I. und Strietzel, R. *Einfluß simulierter keramischer Brände auf die Ionenabgabe von Dentallegierungen und Titan.* Zahnärztl Welt 107, 1998. S. 686-691.
- [85] Hildebrand, G., et al. *Localized electrochemical investigations of Pd73Cu13.5 ceramic firing dental alloys in DIN-saliva.* Corrosion Science 48/11, 2006. S. 3629-3645.
- [86] Viennot, S., et al. *Corrosion resistance of cobalt-chromium and palladium-silver alloys used in fixed prosthetic restorations.* Eur J Oral Sci. 113, 2005. S. 90-95.

- [87] Rau, G. und Ströbel, R. *Die Metalle in der Zahntechnik - 16. völlig überarbeitete Auflage*. München: Verlag Neuer Merkur, 1992. S. 131.
- [88] Scheutzel, P., Terpelle, T. und Marega, V. *Zur Korrosionsbeständigkeit zahnärztlich verwendeter Legierungen gegenüber säurehaltigen Getränken*. Dtsch Zahnärztl Z. 53, 1989. S. 204-210.
- [89] Darwell, B.W. *The development of an artificial saliva for in vitro amalgam corrosion studies*. J Oral Rehabil. 5, 1978. S. 41-49.
- [90] Geis-Gerstorfer, J. und Greener, G. *The influence of chlorine ions and pH value on the cation release from Ni-20Cr-Mo alloys*. Clinclal Materials 4, 1989. S. 225-240.
- [91] Kedici, S.P., et al. *Corrosion behavior of dental metals and alloys in different media*. J Oral Rehabil. 25/10, 1998. S. 800-808.
- [92] Eichner, K. und Kappert, H.F. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 1 Grundlagen und Verarbeitung - 6. neubearbeitete und erweiterte Auflage*. München: Hüthig, 1996. S. 136-137.
- [93] Geis-Gerstorfer, J. und Weber, H. *Grundsätzliches zur Methodik potentiodynamischer Polarisationsmessungen an Dentallegierungen in künstlichen Speicheln*. Dtsch Zahnärztl Z. 42, 1987. S. 91-97.
- [94] Kappert, H.F. und Eichner, K. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2 Werkstoffe unter klinischen Aspekten - 6. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2008. S. 43.
- [95] Chang, J.C., et al. *Electrochemical study on microbiology-related corrosion of metallic dental materials*. Biomed Mater Eng. 13, 2003. S. 281-295.
- [96] Laurent, F., et al. *Comparison of corrosion behaviour in presence of oral bacteria*. Biomaterials. 22, 2001. S. 2273-2282.
- [97] Kappert, H.F. und Eichner, K. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2 Werkstoffe unter klinischen Aspekten - 6. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2008. S. 50-51.
- [98] —. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2 Werkstoffe unter klinischen Aspekten - 6. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2008. S. 51.

- [99] Strietzel, R. und Viohl, J. *Das Langzeit-Korrosionsverhalten von NEM-Palladiumlegierungen und Titan in künstlichem Speichel*. Dtsch Zahnärztl Z. 47, 1992. S. 535-538.
- [100] Kappert, H.F. und Eichner, K. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2 Werkstoffe unter klinischen Aspekten - 6. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2008. S. 56.
- [101] Geis-Gerstorfer, J. *In vitro corrosion measurement of dental alloys*. J Dent. 22, 1994. S. 247-251.
- [102] Kappert, H.F. und Eichner, K. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2 Werkstoffe unter klinischen Aspekten - vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2008. S. 57.
- [103] Heitz, E., Henkhaus, R. und Rahmel, A. *Korrosionskunde im Experiment*. Weinheim: Verlag Chemie, 1983. S. 16.
- [104] Nascimento, M.L., et al. *Electrochemical characterization of cobalt-based alloys using the mini-cell system*. Dent Mater 23, 2007. S. 369-373.
- [105] Matkovic, T., Slokar, L. und Matkovic, P. *Structure and properties of biomedical Co-Cr-Ti alloys*. Journal of Alloys and Compounds 407, 2006. S. 294-298.
- [106] Schmidt, R. *Werkstoffverhalten in biologischen Systemen - 2. Auflage*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. S. 104.
- [107] *EG&G Princeton Applied Research Application Note CORR 1: Basics of Corrosion Measurements*. P.O. Box 2565, NJ 08540, USA, 1980.
- [108] Geis-Gerstorfer, J. und Greener, E.H. *Zum Einfluß des Mo-Gehaltes und des pH-Wertes auf das Korrosionsverhalten von Ni-20Cr-Mo-Dentallegierungen*. Dtsch Zahnärztl Z. 44, 1989. S. 863-866.
- [109] Geis-Gerstorfer, J. *Korrosion von NiCr20Mo Dentallegierungen: Vergleichende elektrochemische und spektroskopische Untersuchungen*. Dissertation, 1991. S. 29.
- [110] Schwickerath, H. *Zur Passivierung von Dentallegierungen*. Quintessenz Zahntech 19, 1993. S. 403-408.

- [111] Weber, H. *Edelmetallfreie (NEM) Kronen-, Brücken-, und Geschiebeprothetik*. Berlin: Quintessenz Verlag, 1985. S. 171.
- [112] Kappert, H.F. und Eichner, K. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2 Werkstoffe unter klinischen Aspekten - vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2008. S. 45.
- [113] Schille, C., et al. *Elektrochemische Korrosionsmessungen an experimentellen CoCr-Legierungen mit abgestuftem Cr-Gehalt*. Wuppertal: DGZPW, 2006. S. Abstract 3337.
- [114] Grimme, D. *Merkblatt 821 - Edelstahl Rostfrei - Eigenschaften*. Düsseldorf: Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 1997. S. 9.
- [115] Hashimoto, K., et al. *The role of corrosion-resistant alloying elements in passivity*. Corrosion Science 49, 2007. S. 42-52.
- [116] Schille, C., et al. *Influence of Mo, W and N on the electrochemical corrosion behaviour of CoCr alloys for use as restorative materials in dentistry*. Nürnberg: MSE, 2008.
- [117] Hodgson, A.W.E., et al. *Passive and transpassive behaviour of CoCrMo in simulated biological solutions*. Electrochimica Acta 49, 2004. S. 2167-2178.
- [118] ISO 10271:2001 (Entwurf 07.02.2008).
- [119] DIN Deutsches Institut für Normung. *DIN-Taschenbuch 267/1 "Zahnheilkunde 1 - Werkstoffe" - 3. Auflage*. Berlin: Beuth Verlag, 2013. S. 527-553.
- [120] Risse, A. *Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012. S. 18.
- [121] Jessen, C.Q. *Nichtrostender Stahl und Korrosion 1. Ausgabe, 1. Auflage*. Denmark: Damstahl a/s, 2011. S. 93.
- [122] Eichner, K. und Kappert, H.F. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 1 Grundlagen und Verarbeitung - 6. neubearbeitete und erweiterte Auflage*. München: Hüthig, 1996. S. 144-152.
- [123] Jessen, C.Q. *Nichtrostender Stahl und Korrosion 1. Ausgabe, 1. Auflage*. Denmark: Damstahl a/s, 2011. S. 96.

Anhang

Optische Untersuchung der Prüfkörper vor dem statischen Immersionstest

Tabelle 9: Oberflächenzustand der Legierungen vor dem statischen Immersionstest

Legierung	Anmerkung
Co-1	-bei allen Proben von Co-1 war die Oberfläche im Vergleich zu allen anderen Proben verkratzt
Co-1 Probe 1	-verkratzt
Co-1 Probe 2	-kleine Lunker auf einer Seite
Co-1 Probe 3	-undefinierbare Defekte
Co-1 Probe 4	-kleine Lunker auf einer Seite -viele kleine Punkte auf Rückseite
Co-1 Probe 5	-unauffällig
Co-2	
Co-2 Probe 1	-Lunker beidseitig
Co-2 Probe 2	-kleine Lunker auf einer Seite -eventuell Defekte
Co-2 Probe 3	-unauffällig
Co-2 Probe 4	-Lunker auf einer Seite -kleine Randdefekte
Co-2 Probe 5	-Lunker auf einer Seite -eventuell Defekte
Co-3	
Co-3 Probe 1	-unauffällig
Co-3 Probe 2	-auf einer Seite undefinierbare Defekte -undefinierbare Randdefekte
Co-3 Probe 3	-auf einer Seite Kornseigerungen
Co-3 Probe 4	-zwei kleine Lunker auf einer Seite
Co-3 Probe 5	-beidseitige Lunker
Co-4	
Co-4 Probe 1	-unauffällig
Co-4 Probe 2	-unauffällig
Co-4 Probe 3	-eine kleiner Lunker auf einer Seite
Co-4 Probe 4	-ein kleiner Lunker auf einer Seite
Co-4 Probe 5	-ein kleiner Lunker auf einer Seite

Messprotokoll statischer Immersionstest

Tabelle 10: Messprotokoll statischer Immersionstest

Statischer Immersionstest																
Legierung	Co-1			Probe 2			Probe 3			Probe 4			Probe 5			
	Länge	Breite	Dicke													
	mm	mm	mm													
	29,78	9,82	1,3	29,93	9,85	1,22	29,86	9,79	1,24	28,47	8,41	1,33	28,92	9,74	1,2	
	29,68	9,85	1,34	29,91	9,84	1,21	29,73	9,72	1,22	28,34	8,46	1,32	28,9	9,53	1,18	
			1,15			1,23			1,17			1,32			1,3	
			1,18			1,2			1,2			1,31			1,3	
			1,24			1,21			1,24			1,4			1,25	
			1,26			1,22			1,2			1,41			1,26	
			1,26			1,22			1,2			1,4			1,31	
			1,2			1,21			1,19			1,39			1,35	
Mittelwert	29,73	9,835	1,2413	29,92	9,845	1,215	29,795	9,755	1,2075	28,405	8,435	1,36	28,91	9,635	1,2688	
Oberfläche		683,01	mm²		685,75	mm²		676,81	mm²		579,4	mm²		654,9	mm²	
Oberfläche		6,8301	cm²		6,8575	cm²		6,7681	cm²		5,794	cm²		6,549	cm²	
Volumen		362,93	mm³		357,89	mm³		350,96	mm³		325,85	mm³		353,41	mm³	
Legierung	Co-2			Probe 2			Probe 3			Probe 4			Probe 5			
	Länge	Breite	Dicke													
	mm	mm	mm													
	29,78	9,66	1,18	29,57	9,66	1,39	29,77	9,6	1,27	29,76	9,73	1,3	29,19	9,82	1,31	
	29,76	9,67	1,19	29,55	9,66	1,4	29,73	9,73	1,26	29,71	9,6	1,29	29,12	9,83	1,32	
			1,36			1,39			1,36			1,35			1,3	
			1,37			1,4			1,35			1,35			1,3	
			1,36			1,35			1,36			1,35			1,32	
			1,33			1,35			1,33			1,33			1,32	
			1,33			1,37			1,33			1,34			1,32	
			1,26			1,38			1,34			1,32			1,32	
Mittelwert	29,77	9,665	1,2975	29,56	9,66	1,3788	29,75	9,665	1,325	29,735	9,665	1,3288	29,155	9,825	1,3138	
Oberfläche		677,79	mm²		679,25	mm²		679,52	mm²		679,48	mm²		675,32	mm²	
Oberfläche		6,7779	cm²		6,7925	cm²		6,7952	cm²		6,7948	cm²		6,7532	cm²	
Volumen		373,33	mm³		393,7	mm³		380,98	mm³		381,87	mm³		376,32	mm³	
Legierung	Co-3			Probe 2			Probe 3			Probe 4			Probe 5			
	Länge	Breite	Dicke													
	mm	mm	mm													
	29,5	9,72	1,35	29,08	9,7	1,38	29,67	9,74	1,33	29,8	9,85	1,34	29,09	9,81	1,42	
	29,51	9,73	1,36	28,86	9,76	1,37	29,7	9,73	1,3	29,76	9,87	1,32	28,88	9,83	1,43	
			1,35			1,26			1,4			1,3			1,41	
			1,34			1,26			1,42			1,34			1,39	
			1,36			1,38			1,39			1,35			1,42	
			1,37			1,26			1,33			1,35			1,42	
			1,35			1,27			1,42			1,3			1,42	
			1,36			1,38			1,34			1,34			1,43	
Mittelwert	29,505	9,725	1,355	28,97	9,73	1,32	29,685	9,735	1,3663	29,78	9,86	1,33	28,985	9,82	1,4175	
Oberfläche		680,19	mm²		665,92	mm²		685,68	mm²		692,7	mm²		679,28	mm²	
Oberfläche		6,8019	cm²		6,6592	cm²		6,8568	cm²		6,927	cm²		6,7928	cm²	
Volumen		388,8	mm³		372,08	mm³		394,82	mm³		390,53	mm³		403,47	mm³	
Legierung	Co-4			Probe 2			Probe 3			Probe 4			Probe 5			
	Länge	Breite	Dicke													
	mm	mm	mm													
	29,67	9,74	1,38	29,33	9,63	1,17	29,41	9,7	1,38	29,77	9,8	1,32	29,32	9,63	1,38	
	29,6	9,73	1,37	29,34	9,59	1,2	29,72	9,65	1,39	29,83	9,67	1,29	29,78	9,64	1,4	
			1,38			1,15			1,38			1,32			1,4	
			1,38			1,16			1,36			1,33			1,39	
			1,39			1,31			1,21			1,44			1,29	
			1,42			1,37			1,21			1,42			1,29	
			1,4			1,37			1,21			1,43			1,28	
			1,38			1,33			1,24			1,41			1,28	
Mittelwert	29,635	9,735	1,3875	29,335	9,61	1,2575	29,565	9,675	1,2975	29,8	9,735	1,37	29,55	9,635	1,3388	
Oberfläche		686,25	mm²		661,77	mm²		673,91	mm²		688,53	mm²		674,35	mm²	
Oberfläche		6,8625	cm²		6,6177	cm²		6,7391	cm²		6,8853	cm²		6,7435	cm²	
Volumen		400,29	mm³		354,5	mm³		371,14	mm³		397,44	mm³		381,16	mm³	

Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h) der Prüfkörper

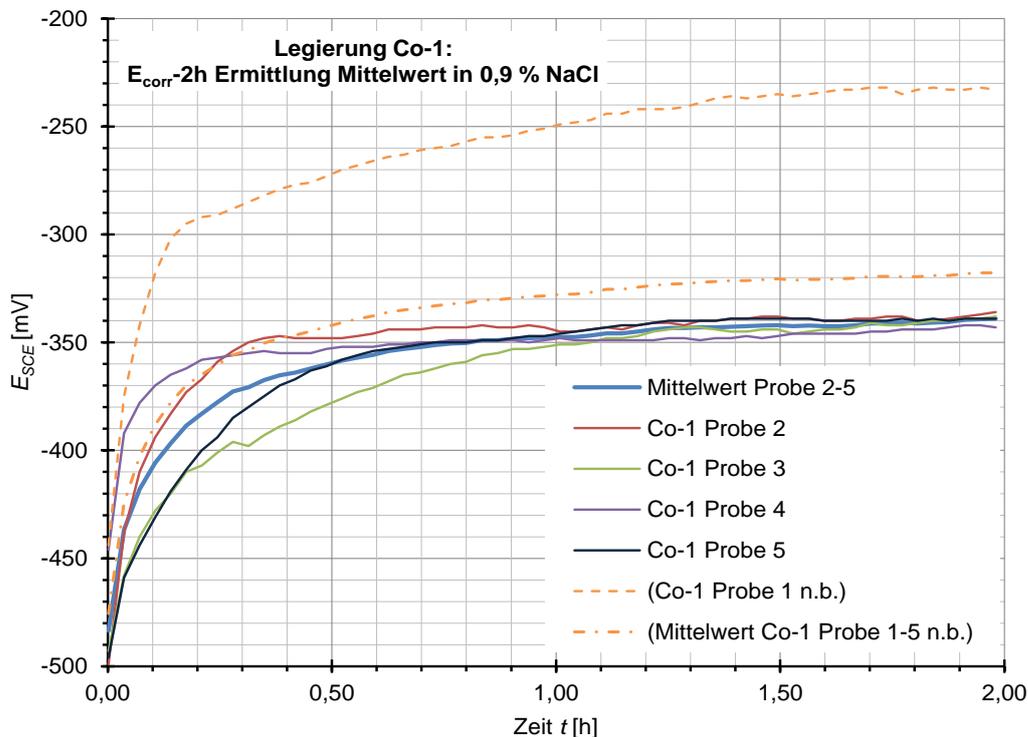


Abbildung 70: Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h) der Prüfkörper der Legierung Co-1 in 0,9 % NaCl

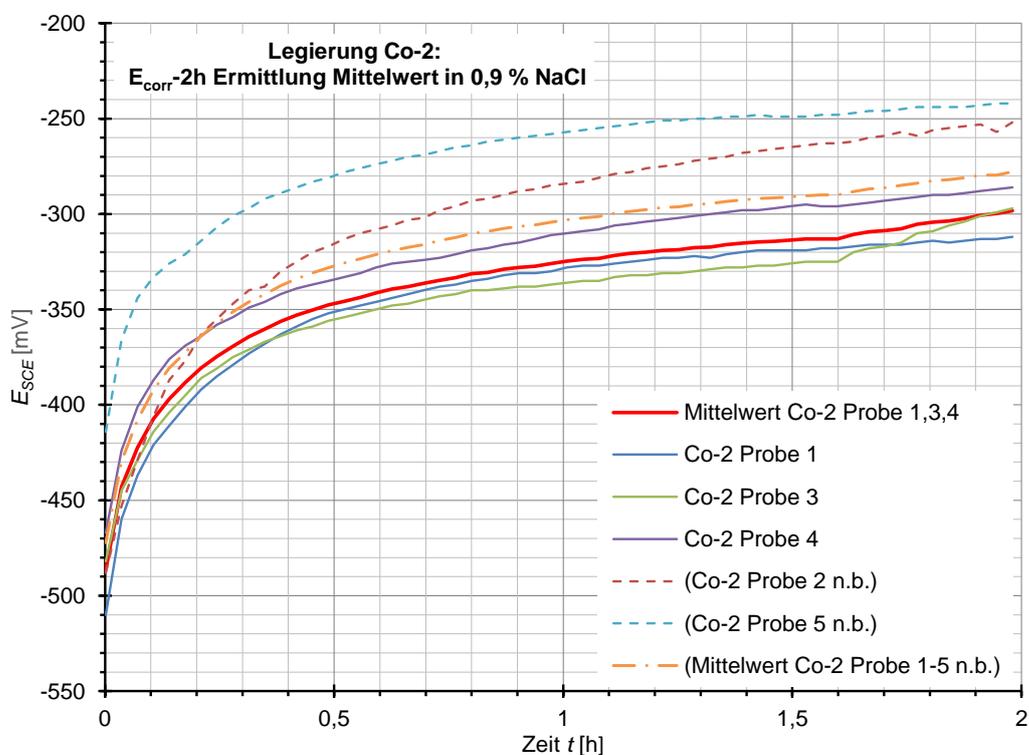


Abbildung 71: Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h) der Prüfkörper der Legierung Co-2 in 0,9 % NaCl

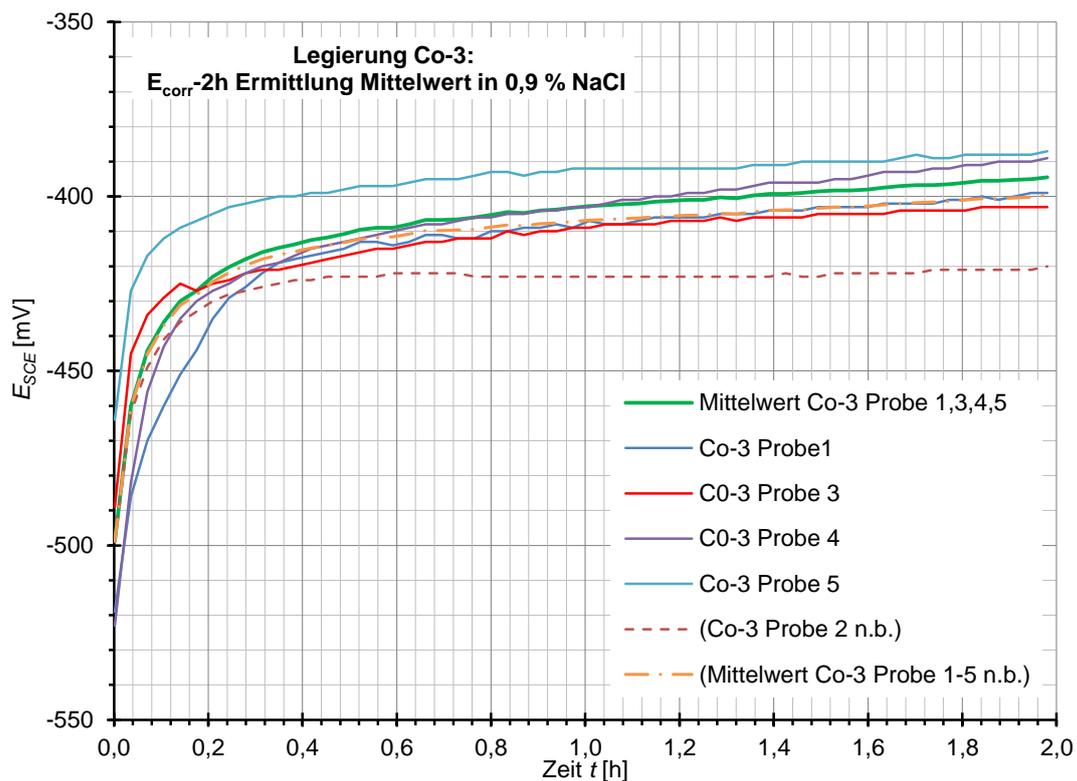


Abbildung 72: Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h) der Prüfkörper der Legierung Co-3 in 0,9 % NaCl

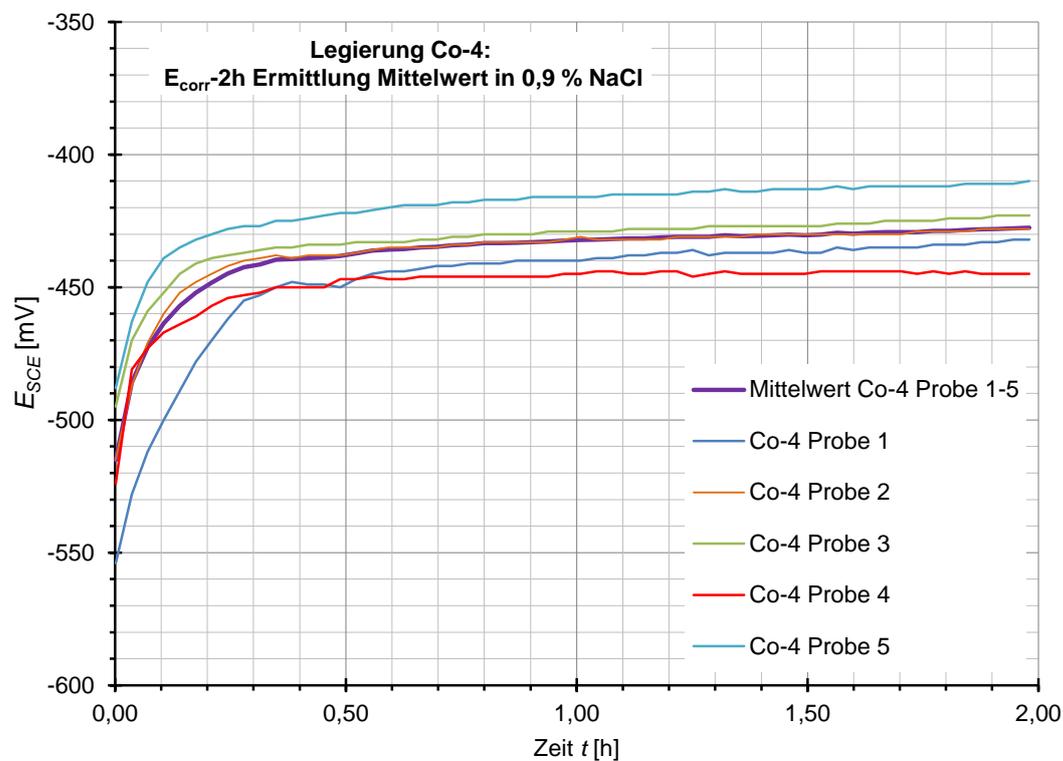


Abbildung 73: Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h) der Prüfkörper der Legierung Co-4 in 0,9 % NaCl

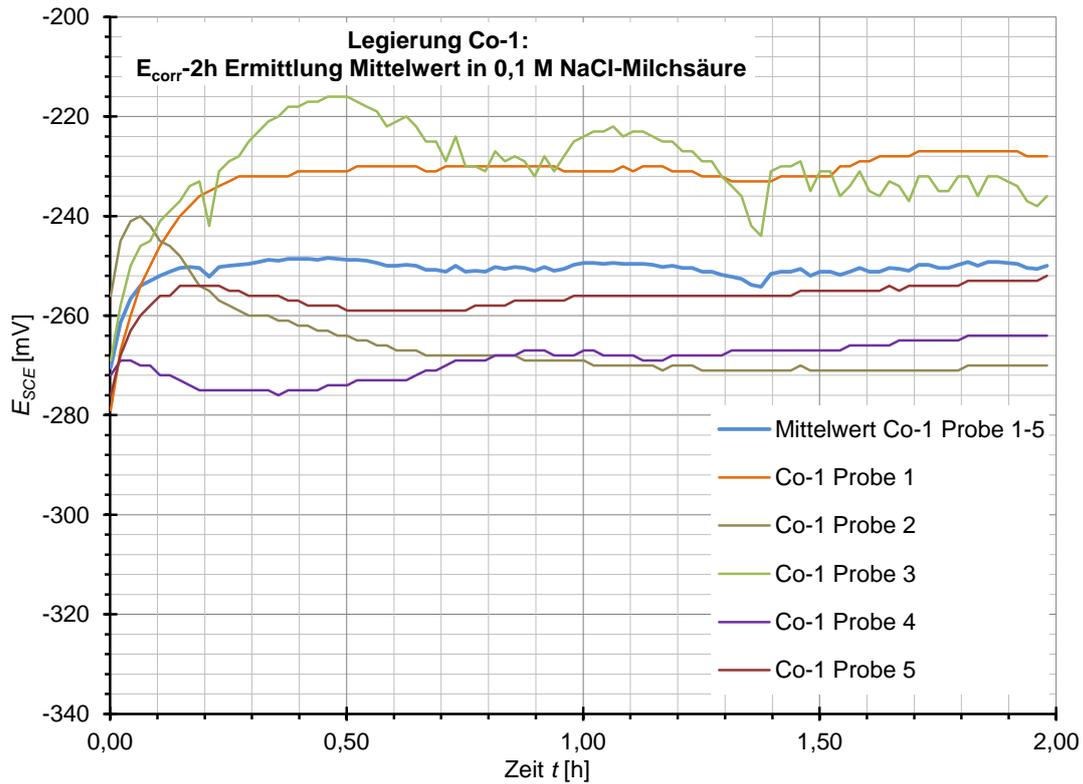


Abbildung 74: Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h) der Prüfkörper der Legierung Co-1 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

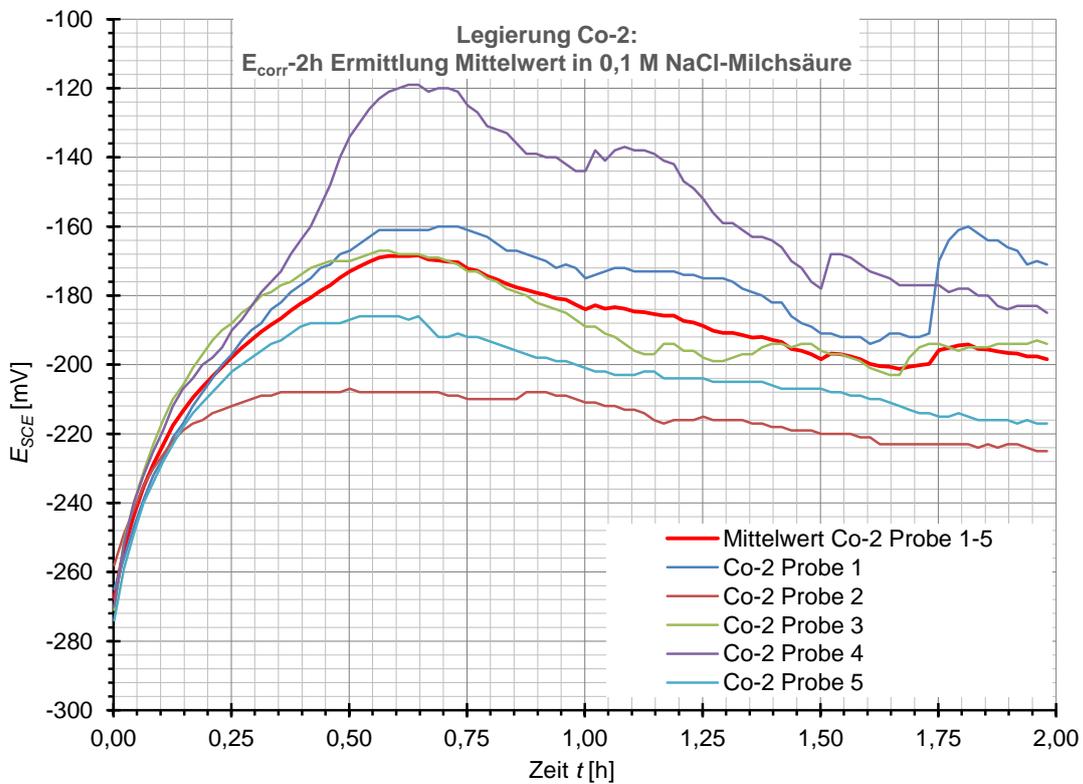


Abbildung 75: Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h) der Prüfkörper der Legierung Co-2 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

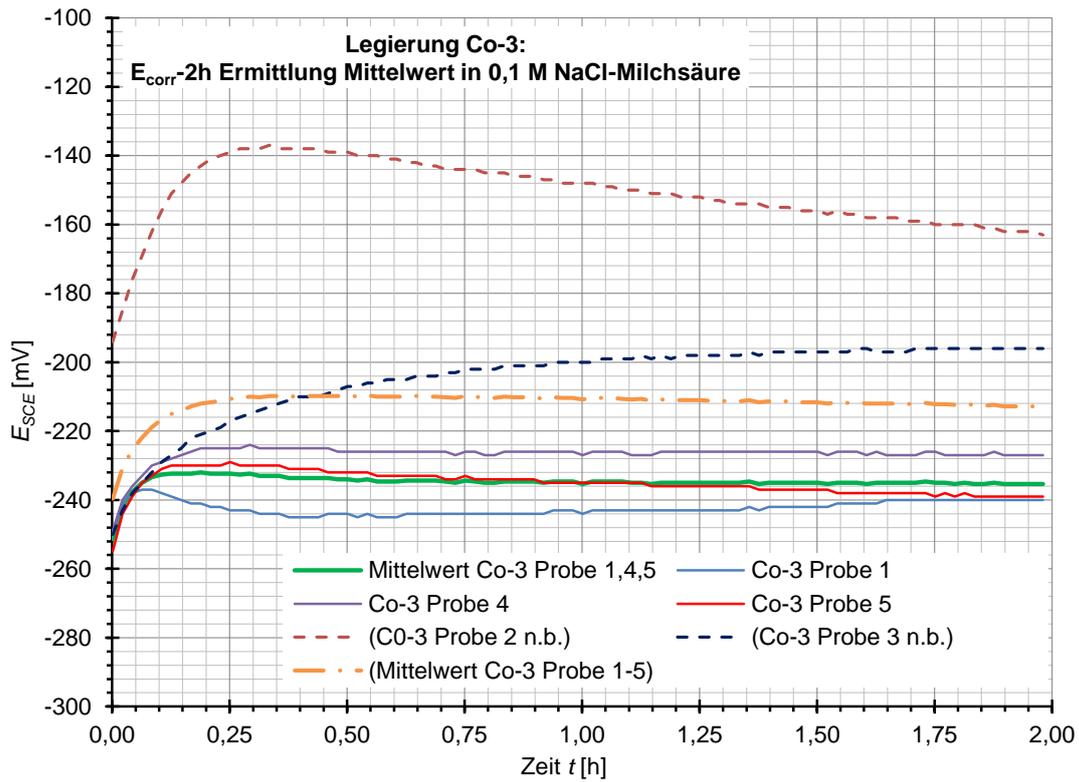


Abbildung 76: Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h) der Prüfkörper der Legierung Co-3 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

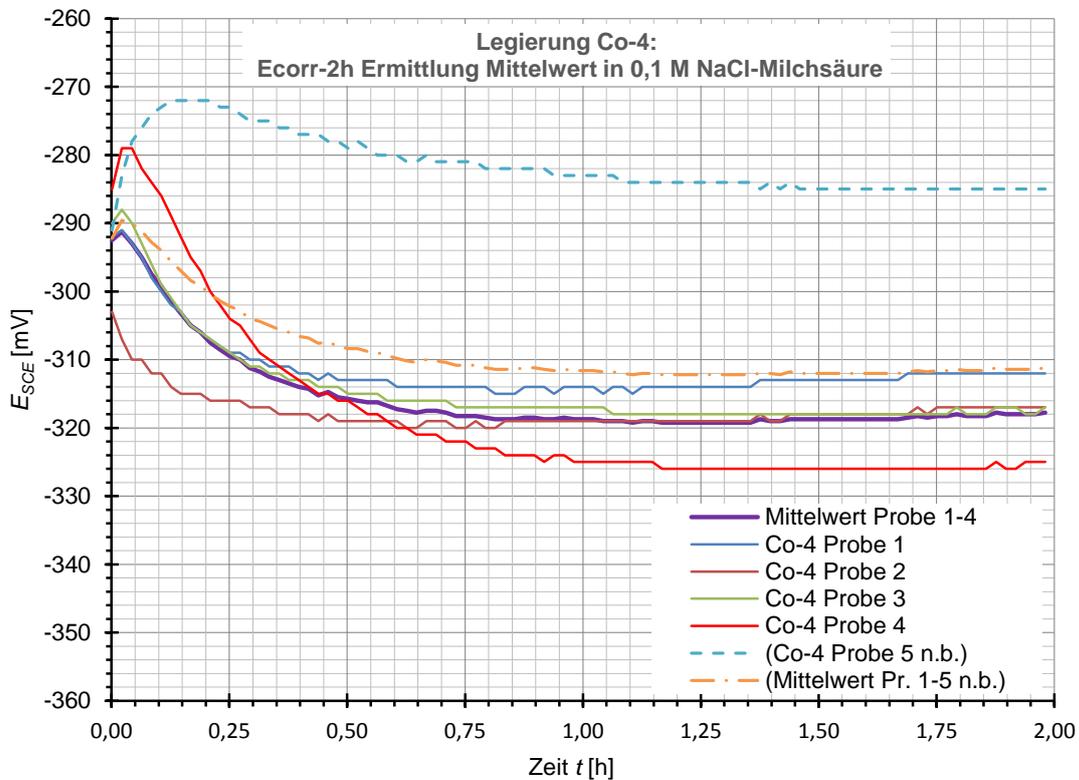


Abbildung 77: Ruhepotentiale (E_{corr} nach 2h) der Prüfkörper der Legierung Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Potentiodynamische Messkurven

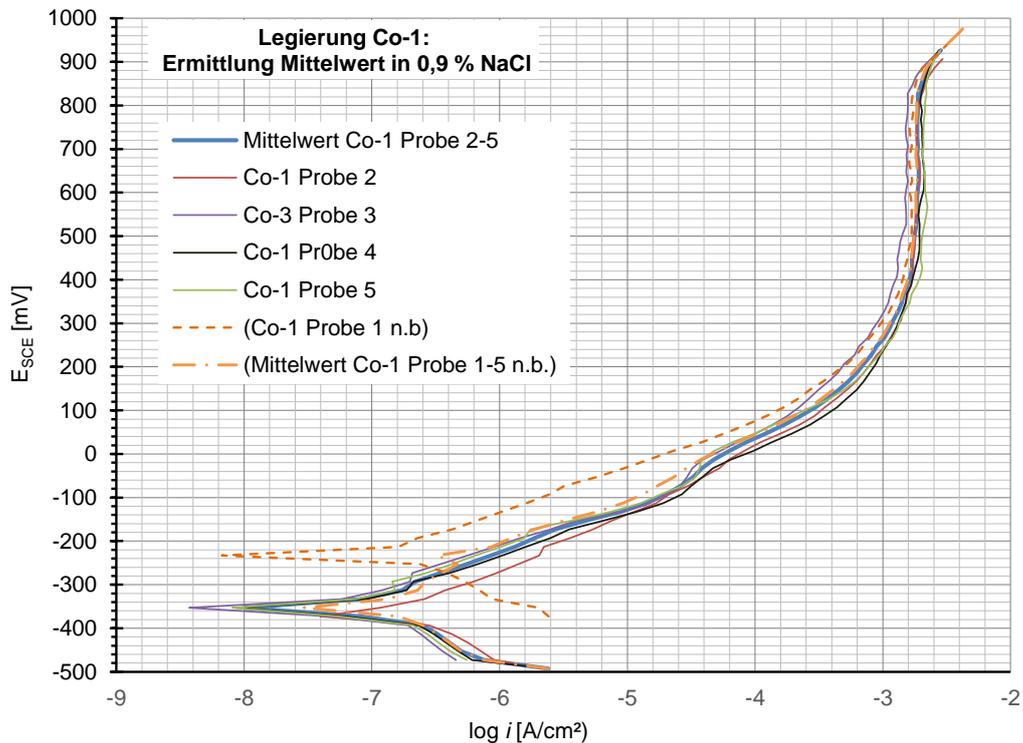


Abbildung 78: Potentiodynamische Messkurven der Prüfkörper der Legierung Co-1 in 0,9 % NaCl

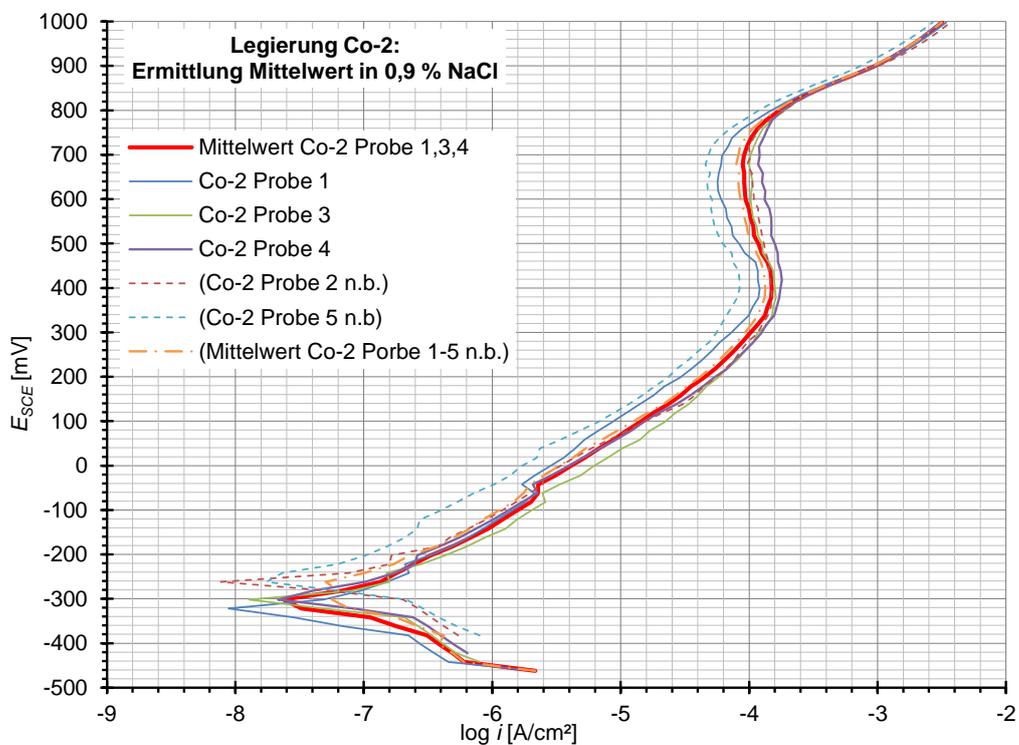


Abbildung 79: Potentiodynamische Messkurven der Prüfkörper der Legierung Co-2 in 0,9 % NaCl

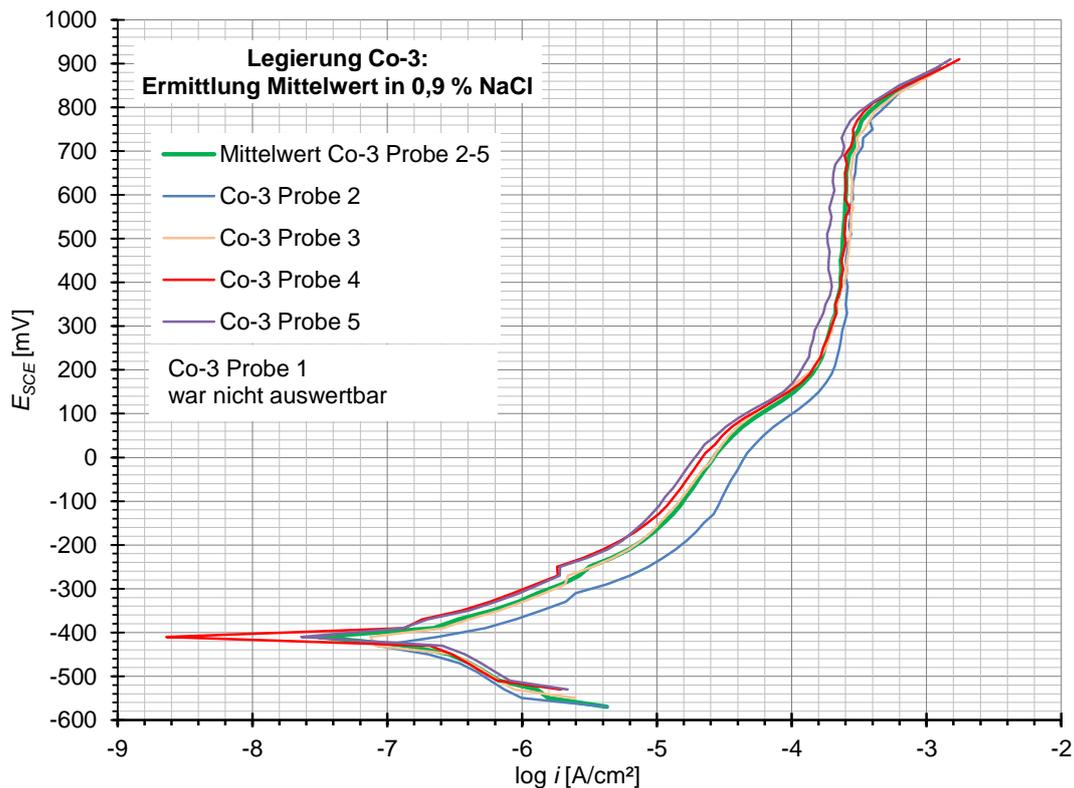


Abbildung 80: Potentiodynamische Messkurven der Prüfkörper der Legierung Co-3 in 0,9 % NaCl

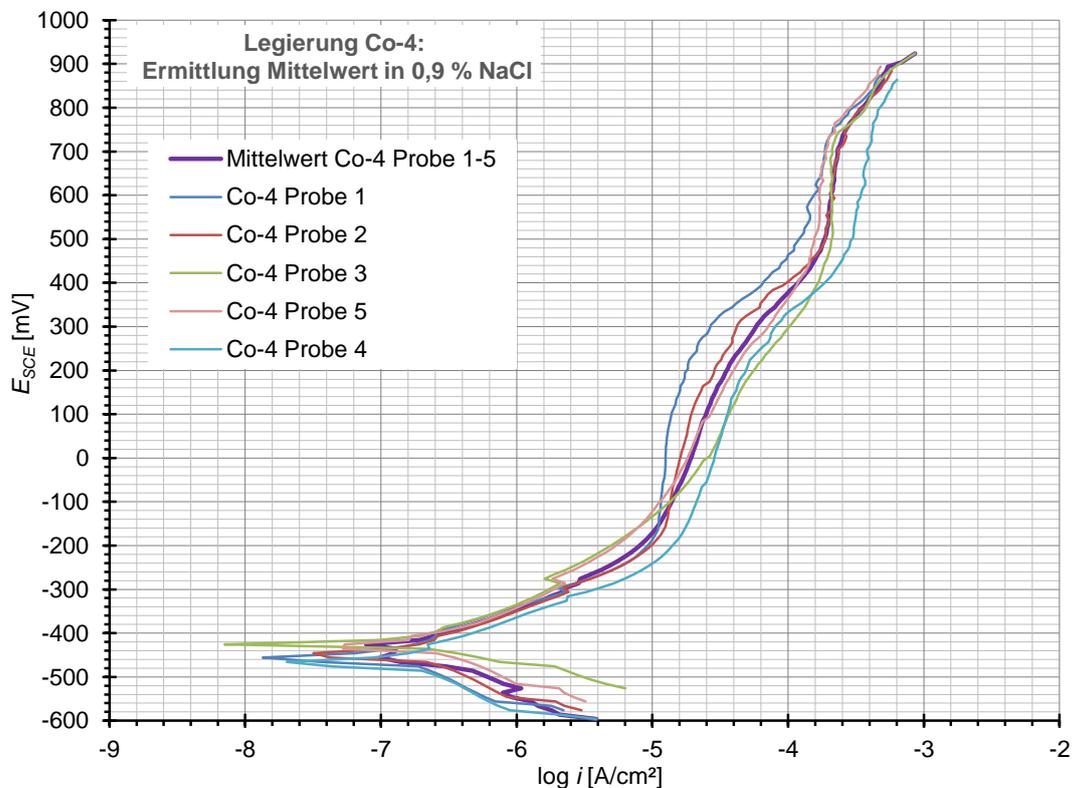


Abbildung 81: Potentiodynamische Messkurven der Prüfkörper der Legierung Co-4 in 0,9 % NaCl

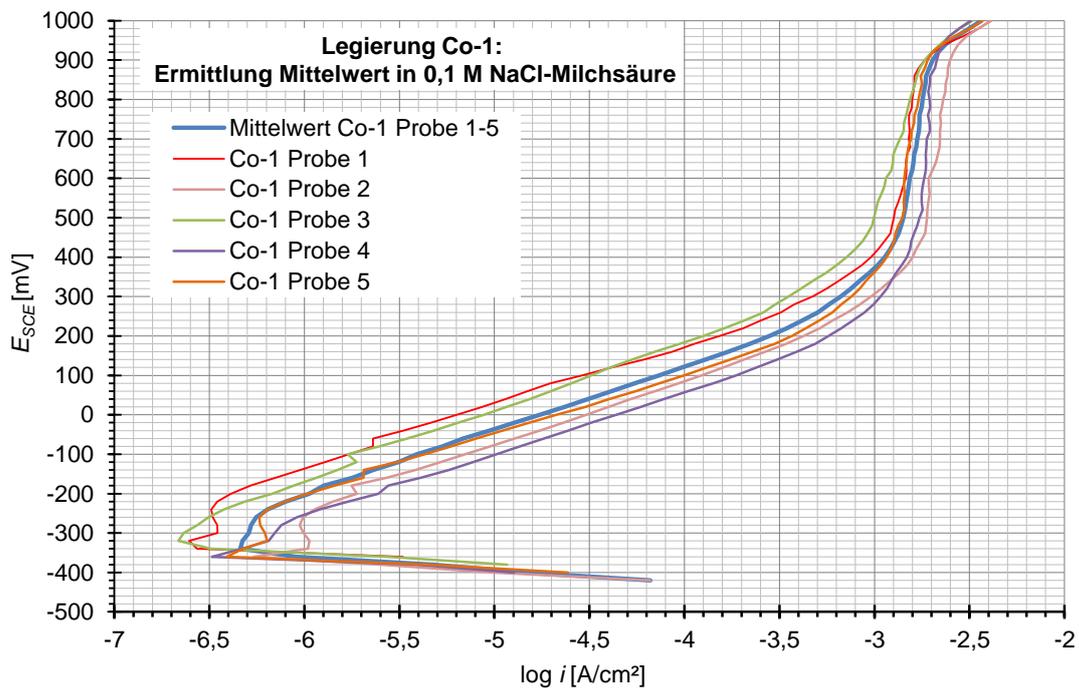


Abbildung 82: Potentiodynamische Messkurven der Prüfkörper der Legierung Co-1 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

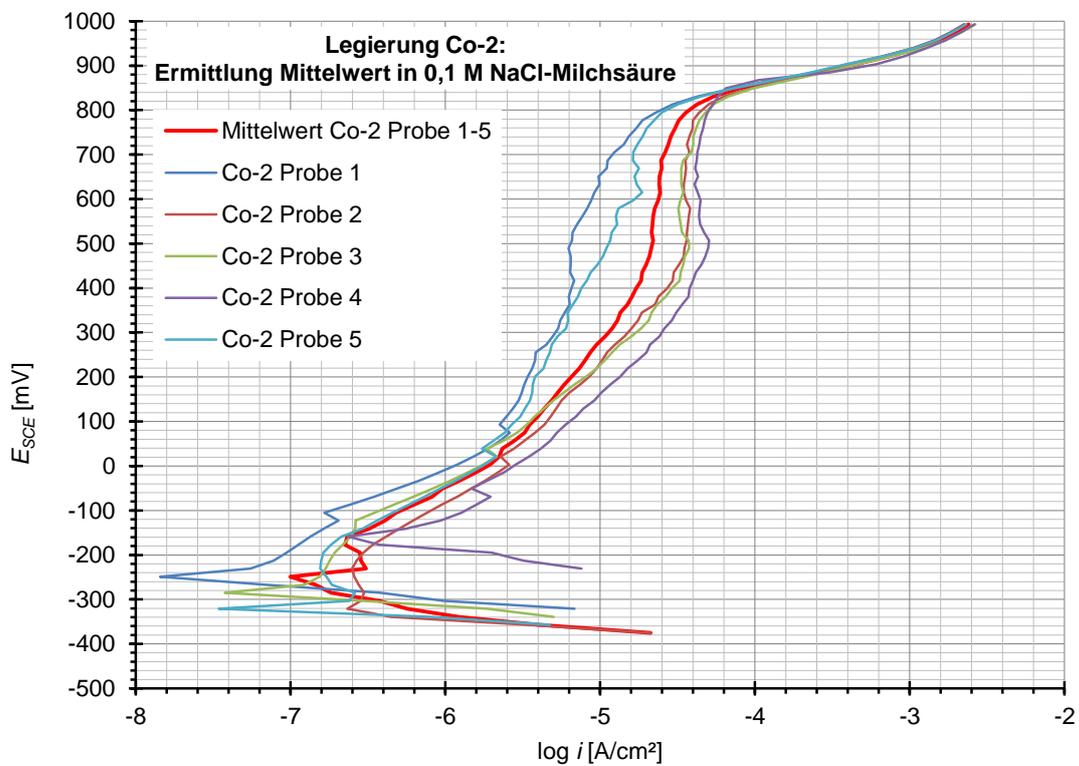


Abbildung 83: Potentiodynamische Messkurven der Prüfkörper der Legierung Co-2 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

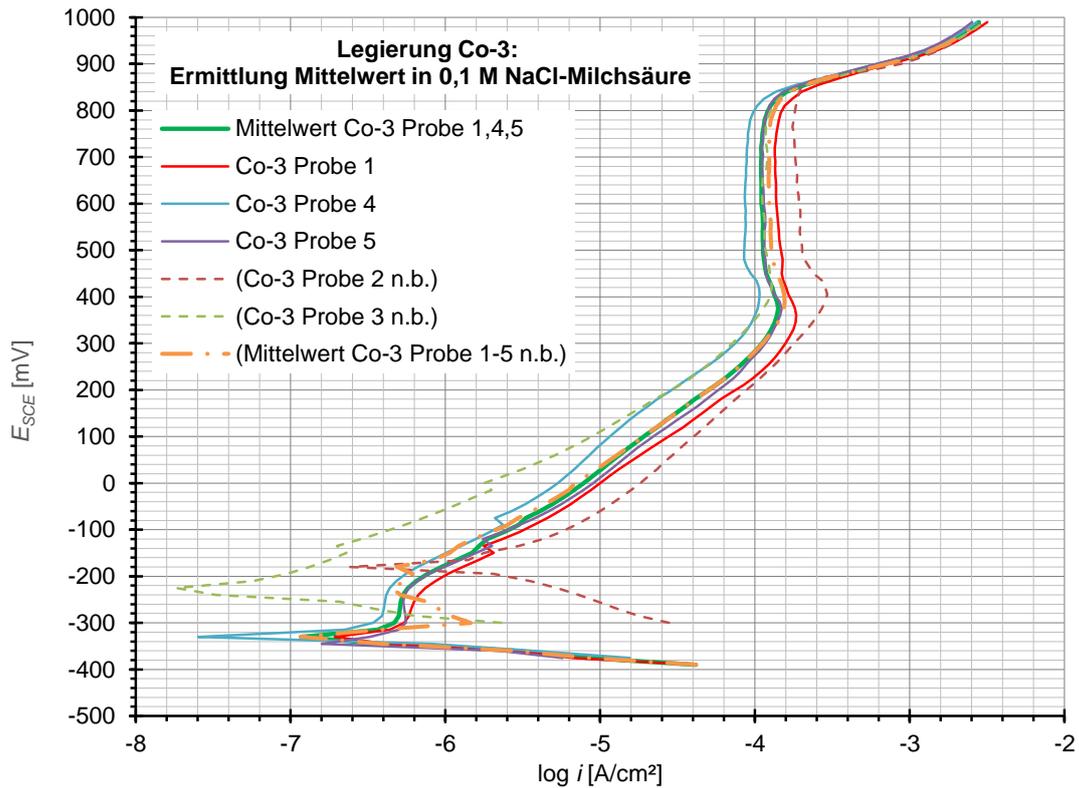


Abbildung 84: Potentiodynamische Messkurven der Prüfkörper der Legierung Co-3 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

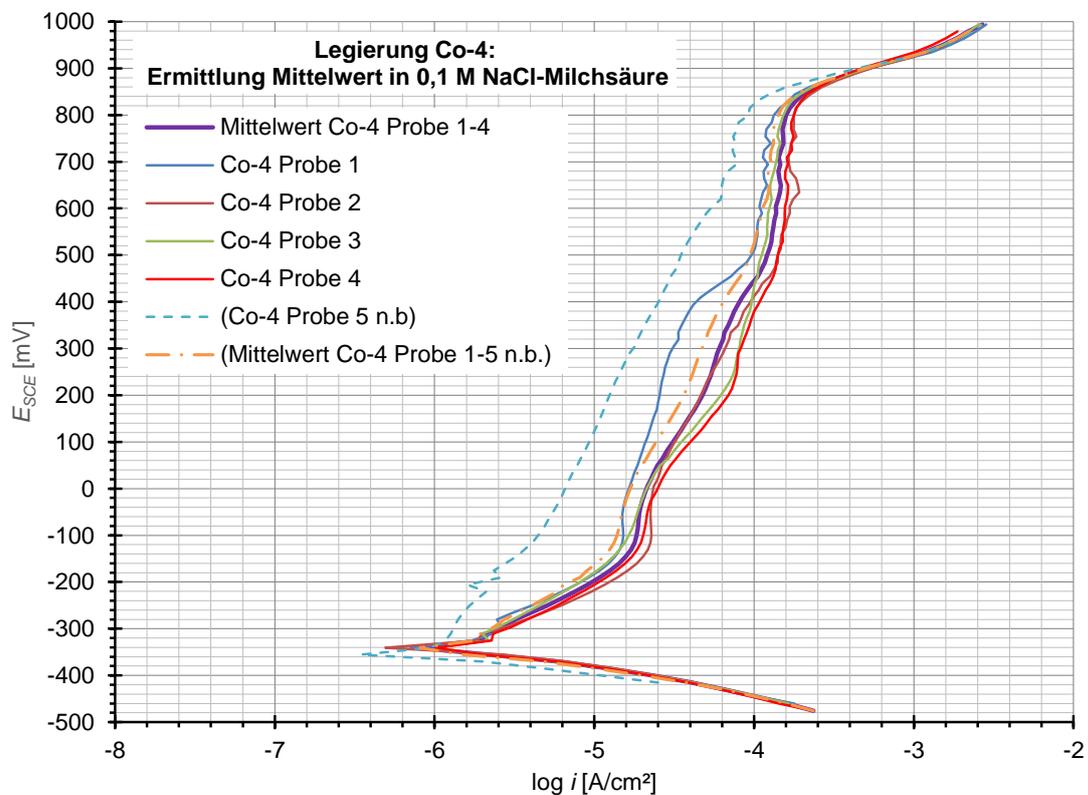


Abbildung 85: Potentiodynamische Messkurven der Prüfkörper der Legierung Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Elektrolytvergleich

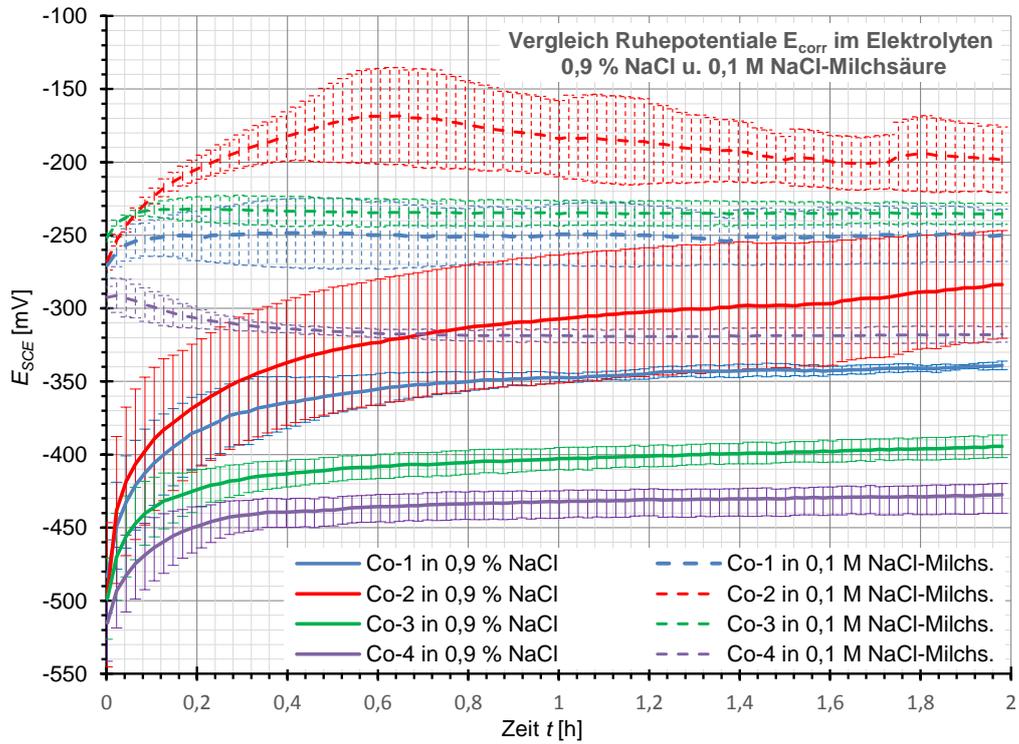


Abbildung 86: Vergleich E_{corr} -Messungen (Mittelwerte aller experimenteller Legierungen) in beiden Elektrolyte

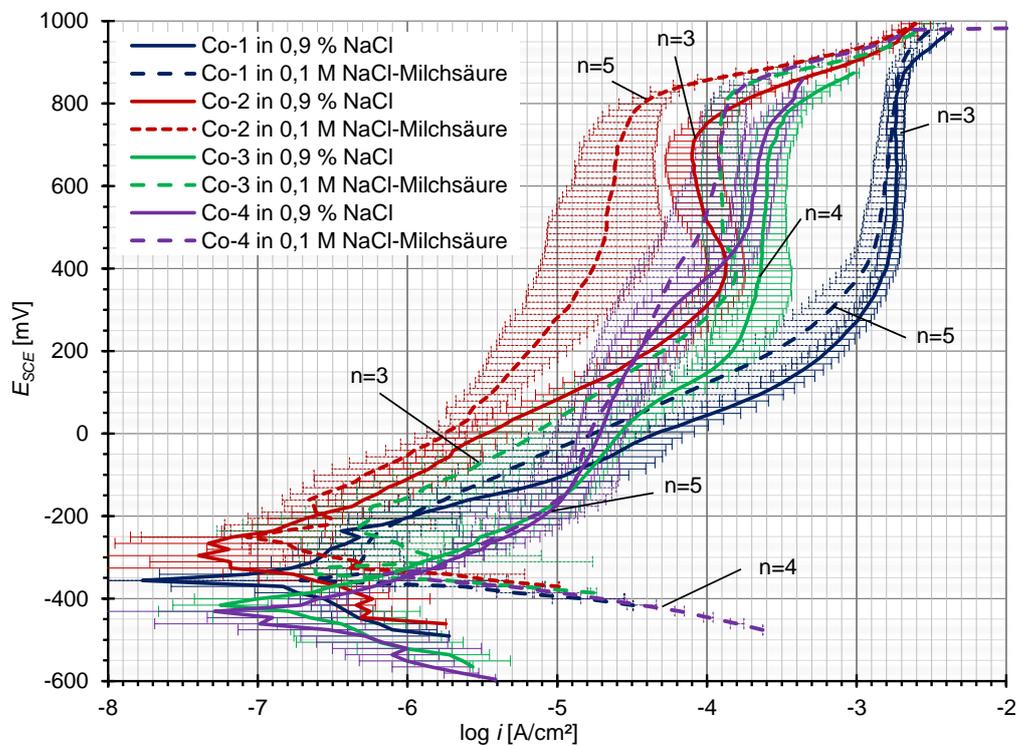


Abbildung 87: Vergleich der potentiodynamischen Messkurven (Mittelwerte aller experimenteller Legierungen) in beiden Elektrolyte

Parameterauswertung der potentiodynamischen Messkurven in Anlehnung an DIN EN ISO 10271:2011 in 0,9 % NaCl

Tabelle 11: Datenwerte Korrosionsprotokoll für Legierung Co-1 in 0,9 % NaCl

Korrosionsmessung nach ISO 10271									
Datenwerte Korrosionsprotokoll			2h Ecorr + potentiodynamisch				V= 1mV/sec		
Elektrolyt: 0,9 % NaCl		A=		0,78 cm ²		E-Start:		-150mV=Ecorr	
Legierung Co-1		E-Ende: 1V							
	E _{corr} n. 2h	E(-6)	E(-5)	Ez	Ep-1	ip-1	Ep-2	ip-2	Rp
	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[µA]	[mV]	[µA]	[Ohm]
Probe 1	-234,00	-123,50	-20,50	-231,50			859,40	1357,00	122500,00
Probe 2	-336,00	-237,50	-107,00	-346,30			856,10	1422,00	121190,00
Probe 3	-339,00	-198,00	-119,50	-349,60			845,10	1236,00	498400,00
Probe 4	-342,00	-223,00	-129,50	-352,10			859,80	1541,00	340900,00
Probe 5	-339,00	-202,50	-112,50	-352,10			889,00	1707,00	401500,00
x	-318,00	-196,90	-97,80	-326,32	#DIV/0!	#DIV/0!	861,88	1452,60	296898,00
s	47,01	44,02	44,02	53,06	#DIV/0!	#DIV/0!	16,29	179,95	169387,70
	icorr	i(300 mV)	i(300+Ez)	βa	βc	Ages	Q1(Ez-300)	Q2(300-700)	Q3(700-1000)
	[nA]	[µA]	[µA]			[C]	[C]	[C]	[C]
Probe 1	111,6000	752,00	69,10	111,40	114,00	1,112	0,08556	0,4759	0,5482
Probe 2	152,8000	941,00	25,70	134,90	135,40	1,238	0,122	0,5338	0,5801
Probe 3	33,8800	706,00	23,00	99,86	111,60	1,051	0,09103	0,4253	0,5324
Probe 4	64,5700	1014,00	30,30	106,60	129,00	1,304	0,1548	0,576	0,5701
Probe 5	49,4500	1053,00	26,70	112,30	118,70	1,344	0,1355	0,6119	0,5944
x	82,46	893,20	34,96	113,01	121,74	1,21	0,12	0,52	0,57
s	48,90	156,04	19,26	13,19	10,14	0,12	0,03	0,08	0,02
	ΣQ1*Q2+Q3	i(500mV)					Q4(Ez-300)	Q5(Ez-700)	Q6(Ez-900)
	[C]	[µA]					[C]	[C]	[C]
Probe 1	1,10966	1325					0,08556	0,5622	0,8374
Probe 2	1,2359	1392					0,122	0,6568	0,9609
Probe 3	1,04873	1100					0,09103	0,5171	0,7749
Probe 4	1,3009	1521					0,1548	0,7318	1,054
Probe 5	1,3418	1590					0,1355	0,7484	1,088
x	1,207398	1385,6					0,117778	0,64326	0,94304
s	0,124847043	190,6523013					0,029393784	0,101936441	0,135162284
Elimination der nicht berücksichtigten Proben, Strom- u. Ladungswerte flächenbezogen									
Probenanzahl: n=4									
	E _{corr} n. 2h	E(-6)	E(-5)	Ez	Ep-1	ip-1	Ep-2	ip-2	Rp
	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[µA/cm ²]	[mV]	[µA/cm ²]	[Ohm/cm ²]
Probe 1									
Probe 2	-336,00	-237,50	-107,00	-346,30			856,10	1823,08	121190,00
Probe 3	-339,00	-198,00	-119,50	-349,60			845,10	1584,62	498400,00
Probe 4	-342,00	-223,00	-129,50	-352,10			859,80	1975,64	340900,00
Probe 5	-339,00	-202,50	-112,50	-352,10			889,00	2188,46	401500,00
x	-339,00	-215,25	-117,13	-350,03			862,50	1892,95	340497,50
s	2,45	18,40	9,71	2,75			18,74	254,37	159948,37
	icorr	i(300 mV)	i(300+Ez)	βa	βc	Ages	Q1(Ez-300)	Q2(300-700)	Q3(700-1000)
	[nA/cm ²]	[µA/cm ²]	[µA/cm ²]			[C/cm ²]			
Probe 1									
Probe 2	195,8974	1206,4103	32,9487	134,90	135,40	1,5872	0,1564	0,6844	0,7437
Probe 3	43,4359	905,1282	29,4872	99,86	111,60	1,3474	0,1167	0,5453	0,6826
Probe 4	82,7821	1300,0000	38,8462	106,60	129,00	1,6718	0,1985	0,7385	0,7309
Probe 5	63,3974	1350,0000	34,2308	112,30	118,70	1,7231	0,1737	0,7845	0,7621
x	96,38	1190,38	33,88	113,42	123,68	1,58	0,16	0,69	0,73
s	68,26	199,27	3,87	15,20	10,59	0,17	0,03	0,10	0,03
	ΣQ1*Q2+Q3	i(500mV)					Q4(Ez-300)	Q5(Ez-700)	Q6(Ez-900)
	[C/cm ²]	[µA/cm ²]					[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]
Probe 1									
Probe 2	1,5845	1784,615385					0,1564	0,8421	1,2319
Probe 3	1,3445	1410,25641					0,1167	0,6629	0,9935
Probe 4	1,6678	1950					0,1985	0,9382	1,3513
Probe 5	1,7203	2038,461538					0,1737	0,9595	1,3949
x	1,579272436	1795,833333					0,161323718	0,850673077	1,242884615
s	0,166183126	277,7476151					0,034388929	0,135175367	0,179983456
Q1-Q3: Auswertung nach Reclaru et al.									
Q4-Q6: Auswertung nach Maranche et al.									

Tabelle 12: Datenwerte Korrosionsprotokoll für Legierung Co-2 in 0,9 % NaCl

Korrosionsmessung nach ISO 10271										
Datenwerte Korrosionsprotokoll			2h Ecorr + potentiodynamisch				V= 1mV/sec			
	Elektrolyt:	0,9% NaCl	A= 0,78 cm ²				E-Start:	-150mV=Ecorr		
	Legierung	Co-2	E-Ende: 1V							
	E _{corr} n. 2h	E(-6)	E(-5)	Ez	Ep-1	ip-1	Ep-2	ip-2	Rp	
	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[µA]	[mV]	[µA]	[Ohm]	
Probe 1	-312,00	-109,00	131,00	-326,40			742,70	43,48	678500,00	
Probe 2	-251,00	-95,50	87,50	-263,80			774,80	67,84	399400,00	
Probe 3	-296,00	-138,00	51,00	-304,30			784,60	71,09	410100,00	
Probe 4	-286,00	-103,50	83,50	-292,90			778,00	77,78	418400,00	
Probe 5	-242,00	-25,50	148,50	-252,00			755,30	30,61	619900,00	
x	-277,40	-94,30	100,30	-287,88	#DIV/0!	#DIV/0!	767,08	58,16	505260,00	
s	29,86	41,67	39,19	30,19	#DIV/0!	#DIV/0!	17,46	20,13	133192,39	
	icorr	i(300 mV)	i(300+Ez)	βa	βc	Ages	Q1(Ez-300)	Q2(300-700)	Q3(700-1000)	
	[nA]	[µA]	[µA]			[C]	[C]	[C]	[C]	
Probe 1	51,9000	56,90	1,59	169,60	129,00	0,2336	0,005779	0,02634	0,2013	
Probe 2	118,4000	91,50	6,12	190,20	194,00	0,2704	0,01002	0,03933	0,2208	
Probe 3	85,1200	93,00	4,48	158,60	157,90	0,2458	0,01115	0,03958	0,1948	
Probe 4	87,6500	98,60	3,36	185,60	156,60	0,2538	0,01033	0,04668	0,1967	
Probe 5	46,7600	43,00	2,26	176,20	110,10	0,1814	0,00444	0,01956	0,1573	
x	77,97	76,60	3,56	176,04	149,52	0,24	0,01	0,03	0,19	
s	29,30	24,96	1,80	12,62	31,91	0,03	0,00	0,01	0,02	
	ΣQ1*Q2+Q3	i (500mV)					Q4(Ez-300)	Q5(Ez-700)	Q6(Ez-900)	
	[C]	[µA]					[C]	[C]	[C]	
Probe 1	0,233419	64,9					0,005779	0,03218	0,07169	
Probe 2	0,27015	103,6					0,01002	0,04944	0,09456	
Probe 3	0,24553	100,6					0,01115	0,05082	0,0955	
Probe 4	0,25371	123					0,01033	0,05711	0,1026	
Probe 5	0,1813	49,7					0,00444	0,02405	0,05564	
x	0,2368218	88,36					0,0084138	0,04272	0,083998	
s	0,03378632	30,1121736					0,0031028	0,01394185	0,019656737	
Elimination der nicht berücksichtigtebn Proben, Strom- u. Ladungswerte flächenbezogen										
Probenanzahl: n=3 (1,3,4)										
	E _{corr} n. 2h	E(-6)	E(-5)	Ez	Ep-1	ip-1	Ep-2	ip-2	Rp	
	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[µA/cm ²]	[mV]	[µA/cm ²]	[Ohm/cm ²]	
Probe 1	-312,00	-109,00	131,00	-326,40			742,70	55,74	678500,00	
Probe 2										
Probe 3	-296,00	-138,00	51,00	-304,30			784,60	91,14	410100,00	
Probe 4	-286,00	-103,50	83,50	-292,90			778,00	99,72	418400,00	
Probe 5										
x	-298,00	-116,83	88,50	-307,87			768,43	82,20	502333,33	
s	13,11	18,54	40,23	17,03			22,53	23,31	152621,24	
	icorr	i(300 mV)	i(300+Ez)	βa	βc	Ages	Q1(Ez-300)	Q2(300-700)	Q3(700-1000)	
	[nA/cm ²]	[µA/cm ²]	[µA/cm ²]			[C/cm ²]				
Probe 1	66,5385	72,9487	2,0385	169,60	129,00	0,2995	0,0074	0,0338	0,2581	
Probe 2										
Probe 3	109,1282	119,2308	5,7436	158,60	157,90	0,3151	0,0143	0,0507	0,2497	
Probe 4	112,3718	126,4103	4,3077	185,60	156,60	0,3254	0,0132	0,0598	0,2522	
Probe 5										
x	96,01	106,20	4,03	171,27	147,83	0,31	0,01	0,05	0,25	
s	25,58	29,02	1,87	13,58	16,32	0,01	0,00	0,01	0,00	
	ΣQ1*Q2+Q3	i (500mV)					Q4(Ez-300)	Q5(Ez-700)	Q6(Ez-900)	
	[C/cm ²]	[µA/cm ²]					[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	
Probe 1	0,2993	83,2051282					0,0074	0,0413	0,0919	
Probe 2										
Probe 3	0,3148	128,974359					0,0147	0,0652	0,1224	
Probe 4	0,3253	157,692308					0,0132	0,0732	0,1315	
Probe 5										
x	0,31310214	123,290598					0,01179872	0,05987607	0,115294872	
s	0,01308816	37,567457					0,0038749	0,01662156	0,02075679	
Q1-Q3: Auswertung nach Reclaru et al.										
Q4-Q6: Auswertung nach Maranche et al.										

Tabelle 13: Datenwerte Korrosionsprotokoll für Legierung Co-3 in 0,9 % NaCl

Korrosionsmessung nach ISO 10271									
Datenwerte Korrosionsprotokoll			2h Ecorr + potentiodynamisch				V= 1mV/sec		
	Elektrolyt:	0,9% NaCl		A=	0,78 cm ²	E-Start:	-150mV=Ecorr		
	Legierung	Co-3					E-Ende: 1V		
	E _{corr} n. 2h	E(-6)	E(-5)	Ez	Ep-1	ip-1	Ep-2	ip-2	Rp
	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[µA]	[mV]	[µA]	[Ohm]
Probe 1	-399,00	-227,50	-7,00	-254,70	16,88	25,88	797,70	166,40	16710,00
Probe 2	-421,00	-353,50	-216,50	-438,00	31,48	39,60	778,10	240,10	101200,00
Probe 3	-403,00	-317,00	-120,50	-419,00	68,08	29,90	767,10	240,10	118700,00
Probe 4	-389,00	-289,00	-98,00	-410,00	39,99	20,46	786,60	207,00	156100,00
Probe 5	-387,00	-293,00	-72,50	-407,00	80,25	23,66	797,50	169,00	126600,00
x	-399,80	-296,00	-102,90	-385,74	47,34	27,90	785,40	204,52	103862,00
s	13,61	46,09	76,42	74,25	26,20	7,39	13,11	36,24	52603,59
	icorr	i(300 mV)	i(300+Ez)	βa	βc	Ages	Q1(Ez-300)	Q2(300-700)	Q3(700-1000)
	[nA]	[µA]	[µA]			[C]	[C]	[C]	[C]
Probe 1	1278,0000	138,90	13,29	264,70	81,85	0,305			
Probe 2	134,9000	187,70	19,70	142,80	46,94	0,4124	0,04023	0,0837	0,2879
Probe 3	118,7000	156,00	10,12	166,10	49,96	0,4149	0,02637	0,0807	0,3074
Probe 4	104,1000	155,30	9,25	161,50	41,28	0,4104	0,02561	0,07475	0,3016
Probe 5	104,4700	122,60	8,25	170,10	46,86	0,3463	0,02156	0,06024	0,2641
x	348,03	152,10	12,12	181,04	53,38	0,38	0,03	0,07	0,29
s	520,02	24,17	4,64	47,92	16,22	0,05	0,01	0,01	0,02
	ΣQ1*Q2+Q3	i (500mV)					Q4(Ez-300)	Q5(Ez-700)	Q6(Ez-900)
	[C]	[µA]					[C]	[C]	[C]
Probe 1	0	184							
Probe 2	0,41183	208					0,04023	0,1241	0,2165
Probe 3	0,41447	214					0,02637	0,1072	0,2008
Probe 4	0,40196	195					0,02561	0,1005	0,1852
Probe 5	0,3459	141,1					0,02156	0,08192	0,158
x	0,314832	188,42					0,0284425	0,10343	0,190125
s	0,17819374	28,8951899					0,008137	0,01744254	0,024939042
Elimination der nicht berücksichtigten Proben, Strom- u. Ladungswerte flächenbezogen									
Probenanzahl: n=4 (2-5)									
	E _{corr} n. 2h	E(-6)	E(-5)	Ez	Ep-1	ip-1	Ep-2	ip-2	Rp
	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[µA/cm ²]	[mV]	[µA/cm ²]	[Ohm/cm ²]
Probe 1									
Probe 2	-421,00	-353,50	-216,50	-438,00			778,10	307,82	101200,00
Probe 3	-403,00	-317,00	-120,50	-419,00			767,10	307,82	118700,00
Probe 4	-389,00	-289,00	-98,00	-410,00			786,60	265,38	156100,00
Probe 5	-387,00	-293,00	-72,50	-407,00			797,50	216,67	126600,00
x	-400,00	-313,13	-126,88	-418,50			782,33	274,42	125650,00
s	15,71	29,62	62,89	13,96			12,89	43,39	22907,13
	icorr	i(300 mV)	i(300+Ez)	βa	βc	Ages	Q1(Ez-300)	Q2(300-700)	Q3(700-1000)
	[nA/cm ²]	[µA/cm ²]	[µA/cm ²]			[C/cm ²]			
Probe 1									
Probe 2	172,9487	240,6410	25,2564	142,80	46,94	0,5287	0,0516	0,1073	0,3691
Probe 3	152,1795	200,0000	12,9744	166,10	49,96	0,5319	0,0338	0,1035	0,3941
Probe 4	133,4615	199,1026	11,8590	161,50	41,28	0,5262	0,0328	0,0958	0,3867
Probe 5	133,9359	157,1795	10,5769	170,10	46,86	0,4440	0,0276	0,0772	0,3386
x	148,13	199,23	15,17	160,13	46,26	0,51	0,04	0,10	0,37
s	18,70	34,08	6,80	12,07	3,62	0,04	0,01	0,01	0,02
	ΣQ1*Q2+Q3	i (500mV)					Q4(Ez-300)	Q5(Ez-700)	Q6(Ez-900)
	[C/cm ²]	[µA/cm ²]					[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]
Probe 1	0,0000								
Probe 2	0,5280	266,666667					0,0516	0,1591	0,2776
Probe 3	0,5314	274,358974					0,0338	0,1374	0,2574
Probe 4	0,5153	250					0,0328	0,1288	0,2374
Probe 5	0,4435	180,897436					0,0276	0,1050	0,2026
x	0,40363077	242,980769					0,03646474	0,13260256	0,24375
s	0,22845352	42,6193359					0,01043205	0,02236223	0,031973131
Q1-Q3: Auswertung nach Reclaru et al.									
Q4-Q6: Auswertung nach Maranche et al.									

Tabelle 14: Datenwerte Korrosionsprotokoll für Legierung Co-4 in 0,9 % NaCl

Korrosionsmessung nach ISO 10271									
Datenwerte Korrosionsprotokoll		2h Ecorr + potentiodynamisch					V= 1mV/sec		
	Elektrolyt:	0,9% NaCl		A=	0,78 cm ²	E-Start:	-150mV=Ecorr		
	Legierung	Co-4					E-Ende: 1V		
	E _{corr} n. 2h	E(-6)	E(-5)	Ez	Ep-1	ip-1	Ep-2	ip-2	Rp
	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[µA]	[mV]	[µA]	[Ohm]
Probe 1	-432,00	-329,00	48,00	-451,00	269,40	12,77	858,60	202,80	181100,00
Probe 2	-428,00	-337,50	-144,00	-449,10	262,00	18,29	854,90	218,70	123600,00
Probe 3	-423,00	-320,00	-105,50	-424,50	182,70	37,05	813,20	175,70	86980,00
Probe 4	-445,00	-351,50	-214,50	-469,00	280,30	42,48	884,20	383,50	141690,00
Probe 5	-411,00	-326,00	-79,50	-430,40	247,40	34,41	858,60	173,00	91390,00
x	-427,80	-332,80	-99,10	-444,80	248,36	29,00	853,90	230,74	124952,00
s	12,44	12,21	96,69	17,76	38,60	12,79	25,59	87,50	38739,09
	icorr	i(300 mV)	i(300+Ez)	βa	βc	Ages	Q1(Ez-300)	Q2(300-700)	Q3(700-1000)
	[nA]	[µA]	[µA]			[C]	[C]	[C]	[C]
Probe 1	155,5000	21,00	8,61	129,90	36,10	0,191	0,006229	0,03504	0,1495
Probe 2	157,9000	32,90	9,89	141,90	130,40	0,2222	0,008629	0,04898	0,1643
Probe 3	210,4000	79,50	8,54	175,90	72,53	0,2268	0,01436	0,05794	0,1541
Probe 4	138,9000	62,20	13,13	125,50	38,62	0,2725	0,01484	0,0821	0,1751
Probe 5	277,1000	55,50	7,44	194,50	137,70	0,1958	0,01046	0,0453	0,1397
x	187,96	50,22	9,52	153,54	83,07	0,22	0,01	0,05	0,16
s	56,60	23,36	2,20	30,24	48,78	0,03	0,00	0,02	0,01
	ΣQ1*Q2+Q3	i (500mV)					Q4(Ez-300)	Q5(Ez-700)	Q6(Ez-900)
	[C]	[µA]					[C]	[C]	[C]
Probe 1	0,190769	95,3					0,006229	0,04129	0,09214
Probe 2	0,221909	150,6					0,008629	0,05764	0,1178
Probe 3	0,2264	163,7					0,01436	0,07238	0,1299
Probe 4	0,27204	231					0,01484	0,097	0,177
Probe 5	0,19546	122					0,01046	0,05581	0,1039
x	0,2213156	152,52					0,0109036	0,064824	0,124148
s	0,03240669	51,2186197					0,00369677	0,02108969	0,032791806
Elimination der nicht berücksichtigten proben, Strom- u. Ladungswerte flächenbezogen Probenanzahl: n=5									
	E _{corr} n. 2h	E(-6)	E(-5)	Ez	Ep-1	ip-1	Ep-2	ip-2	Rp
	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[µA/cm ²]	[mV]	[µA/cm ²]	[Ohm/cm ²]
Probe 1	-432,00	-329,00	48,00	-451,00			858,60	260,00	181100,00
Probe 2	-428,00	-337,50	-144,00	-449,10			854,90	280,38	123600,00
Probe 3	-423,00	-320,00	-105,50	-424,50			813,20	225,26	86980,00
Probe 4	-445,00	-351,50	-214,50	-469,00			884,20	491,67	141690,00
Probe 5	-411,00	-326,00	-79,50	-430,40			858,60	221,79	91390,00
x	-427,80	-332,80	-99,10	-444,80			853,90	295,82	124952,00
s	12,44	12,21	96,69	17,76			25,59	112,18	38739,09
	icorr	i(300 mV)	i(300+Ez)	βa	βc	Ages	Q1(Ez-300)	Q2(300-700)	Q3(700-1000)
	[nA/cm ²]	[µA/cm ²]	[µA/cm ²]			[C/cm ²]			
Probe 1	199,3590	26,9231	11,0385	129,90	36,10	0,2449	0,0080	0,0449	0,1917
Probe 2	202,4359	42,1795	12,6795	141,90	130,40	0,2849	0,0111	0,0628	0,2106
Probe 3	269,7436	101,9231	10,9487	175,90	72,53	0,2908	0,0184	0,0743	0,1976
Probe 4	178,0769	79,7436	16,8333	125,50	38,62	0,3494	0,0190	0,1053	0,2245
Probe 5	355,2564	71,1538	9,5385	194,50	137,70	0,2510	0,0134	0,0581	0,1791
x	240,97	64,38	12,21	153,54	83,07	0,28	0,01	0,07	0,20
s	72,56	29,95	2,81	30,24	48,78	0,04	0,00	0,02	0,02
	ΣQ1*Q2+Q3	i (500mV)					Q4(Ez-300)	Q5(Ez-700)	Q6(Ez-900)
	[C/cm ²]	[µA/cm ²]					[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]
Probe 1	0,2446	122,179487					0,0080	0,0529	0,1181
Probe 2	0,2845	193,076923					0,0111	0,0739	0,1510
Probe 3	0,2903	209,871795					0,0184	0,0928	0,1665
Probe 4	0,3488	296,153846					0,0190	0,1244	0,2269
Probe 5	0,2506	156,410256					0,0134	0,0716	0,1332
x	0,28373795	195,538462					0,01397897	0,08310769	0,159164103
s	0,04154704	65,664897					0,00473945	0,02703806	0,042040777
Q1-Q3: Auswertung nach Reclaru et al.									
Q4-Q6: Auswertung nach Maranche et al.									

Parameterauswertung der potentiodynamischen Messkurven in Anlehnung an DIN EN ISO 10271:2011 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Tabelle 15: Datenwerte Korrosionsprotokoll für Legierung Co-1 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Korrosionsmessung nach ISO 10271									
Datenwerte Korrosionsprotokoll		2h Ecorr + potentiodynamisch				V= 1mV/sec			
Elektrolyt: 0,1 m NaCl-Milchs.		A=		0,78 cm ²		E-Start: -150mV=Ecorr		E-Ende: 1V	
Legierung Co-1									
	E _{corr} n. 2h	E(-6)	E(-5)	Ez	Ep-1	ip-1	Ep-2	ip-2	Rp
	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[µA]	[mV]	[µA]	[Ohm]
Probe 1	-228,00	-120,00	48,50	-335,20			898,40	1230,00	15070,00
Probe 2	-270,00	-227,50	-59,50	-368,00			930,90	1978,00	8506,00
Probe 3	-235,00	-152,50	27,00	-332,10			917,90	1479,00	25360,00
Probe 4	-263,00	-236,00	-84,00	-355,30			911,40	1547,00	12130,00
Probe 5	-252,00	-186,50	-30,50	-355,40			914,70	1391,00	11100,00
x	-249,60	-184,50	-19,70	-349,20	#DIV/0!	#DIV/0!	914,66	1525,00	14433,20
s	17,90	49,22	56,27	15,15	#DIV/0!	#DIV/0!	11,72	279,64	6544,98
	icorr	i(300 mV)	i(300+Ez)	βa	βc	Ages	Q1(Ez-300)	Q2(300-700)	Q3(700-1000)
	[nA]	[µA]	[µA]			[C]	[C]	[C]	[C]
Probe 1	141,2000	369,00	2,81	286,20	20,53	0,8609	0,03049	0,3655	0,4622
Probe 2	501,0000	748,00	8,82	361,30	26,78	1,23	0,07871	0,5526	0,5987
Probe 3	131,9000	276,00	4,18	221,70	24,90	0,7482	0,02535	0,2908	0,4305
Probe 4	273,9000	841,00	15,28	188,70	27,59	1,111	0,1031	0,5075	0,4978
Probe 5	257,7000	591,00	6,73	279,40	23,05	0,932	0,06508	0,3995	0,4654
x	261,14	565,00	7,56	267,46	24,57	0,98	0,06	0,42	0,49
s	148,99	240,98	4,90	66,33	2,86	0,19	0,03	0,11	0,06
	ΣQ1*Q2+Q3	i(500mV)					Q4(Ez-300)	Q5(Ez-700)	Q6(Ez-900)
	[C]	[µA]					[C]	[C]	[C]
Probe 1	0,85819	985					0,03049	0,3974	0,6454
Probe 2	1,23001	1473					0,07871	0,6321	0,9947
Probe 3	0,74665	774					0,02535	0,3165	0,5601
Probe 4	1,1084	1344					0,1031	0,6114	0,9175
Probe 5	0,92998	1092					0,06508	0,4652	0,731
x	0,974646	1133,6					0,060546	0,48452	0,76974
s	0,194061931	279,5465972					0,032800353	0,136081104	0,182585714
Elimination der nicht berücksichtigten Proben, Strom- u. Ladungswerte flächenbezogen									
Probenanzahl: n=5									
	E _{corr} n. 2h	E(-6)	E(-5)	Ez	Ep-1	ip-1	Ep-2	ip-2	Rp
	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[µA/cm ²]	[mV]	[µA/cm ²]	[Ohm/cm ²]
Probe 1	-228,00	-120,00	48,50	-335,20			898,40	1576,92	15070,00
Probe 2	-270,00	-227,50	-59,50	-368,00			930,90	2535,90	8506,00
Probe 3	-235,00	-152,50	27,00	-332,10			917,90	1896,15	25360,00
Probe 4	-263,00	-236,00	-84,00	-355,30			911,40	1983,33	12130,00
Probe 5	-252,00	-186,50	-30,50	-355,40			914,70	1783,33	11100,00
x	-249,60	-184,50	-19,70	-349,20			914,66	1955,13	14433,20
s	17,90	49,22	56,27	15,15			11,72	358,51	6544,98
	icorr	i(300 mV)	i(300+Ez)	βa	βc	Ages	Q1(Ez-300)	Q2(300-700)	Q3(700-1000)
	[nA/cm ²]	[µA/cm ²]	[µA/cm ²]			[C/cm ²]			
Probe 1	181,0256	473,0769	3,6026	286,20	20,53	1,1037	0,0391	0,4686	0,5926
Probe 2	642,3077	958,9744	11,3077	361,30	26,78	1,5769	0,1009	0,7085	0,7676
Probe 3	169,1026	353,8462	5,3590	221,70	24,90	0,9592	0,0325	0,3728	0,5519
Probe 4	351,1538	1078,2051	19,5897	188,70	27,59	1,4244	0,1322	0,6506	0,6382
Probe 5	330,3846	757,6923	8,6282	279,40	23,05	1,1949	0,0834	0,5122	0,5967
x	334,79	724,36	9,70	267,46	24,57	1,25	0,08	0,54	0,63
s	191,02	308,94	6,28	66,33	2,86	0,25	0,04	0,14	0,08
	ΣQ1*Q2+Q3	i(500mV)					Q4(Ez-300)	Q5(Ez-700)	Q6(Ez-900)
	[C/cm ²]	[µA/cm ²]					[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]
Probe 1	1,1002	1262,820513					0,0391	0,5095	0,8274
Probe 2	1,5769	1888,461538					0,1009	0,8104	1,2753
Probe 3	0,9572	992,3076923					0,0325	0,4058	0,7181
Probe 4	1,4210	1723,076923					0,1322	0,7838	1,1763
Probe 5	1,1923	1400					0,0834	0,5964	0,9372
x	1,249546154	1453,333333					0,077623077	0,621179487	0,986846154
s	0,248797348	358,3930733					0,042051734	0,174462954	0,234084249
Q1-Q3: Auswertung nach Reclaru et al.									
Q4-Q6: Auswertung nach Maranche et al.									

Tabelle 16: Datenwerte Korrosionsprotokoll für Legierung Co-2 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Korrosionsmessung nach ISO 10271									
Datenwerte Korrosionsprotokoll			2h Ecorr + potentiodynamisch				V= 1mV/sec		
	Elektrolyt:	0,1 M NaCl-Milchsäure	A=		0,78 cm ²		E-Start:	-150mV=Ecorr	
	Legierung	Co-2	E-Ende: 1V						
	E _{corr} n. 2h	E(-6)	E(-5)	Ez	Ep-1	ip-1	Ep-2	ip-2	Rp
	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[µA]	[mV]	[µA]	[Ohm]
Probe 1	-171,00	8,50		-252,90			790,20	5,67	174500,00
Probe 2	-225,00	-62,50	276,50	-330,30			804,10	30,19	17300,00
Probe 3	-195,00	-20,50	266,50	-288,70			813,00	25,11	81620,00
Probe 4	-186,00	-104,00	196,00	-167,20			849,60	34,84	41840,00
Probe 5	-217,00	-25,50	562,50	-321,60			810,60	18,85	22490,00
x	-198,80	-40,80	325,38	-272,14	#DIV/0!	#DIV/0!	813,50	22,93	67550,00
s	22,19	43,42	162,09	66,12	#DIV/0!	#DIV/0!	22,04	11,33	64909,05
	icorr	i(300 mV)	i(300+Ez)	βa	βc	Ages	Q1(Ez-300)	Q2(300-700)	Q3(700-1000)
	[nA]	[µA]	[µA]			[C]	[C]	[C]	[C]
Probe 1	32,1900	4,00	1,60	189,50	33,00	0,1154	0,0007522	0,002336	0,1122
Probe 2	146,4000	11,60	1,41	450,50	22,07	0,1283	0,001776	0,009695	0,1166
Probe 3	71,9200	13,24	1,49	298,90	27,98	0,1454	0,001635	0,009692	0,134
Probe 4	562,4000	19,70	6,20	277,10	63,86	0,1537	0,002761	0,01274	0,138
Probe 5	116,8000	4,45	1,06	580,80	22,55	0,1197	0,00093	0,003603	0,115
x	185,94	10,60	2,35	359,36	33,89	0,13	0,00	0,01	0,12
s	214,89	6,56	2,16	155,42	17,34	0,02	0,00	0,00	0,01
	ΣQ1*Q2+Q3	i (500mV)					Q4(Ez-300)	Q5(Ez-700)	Q6(Ez-900)
	[C]	[µA]					[C]	[C]	[C]
Probe 1	0,1152882	4,88					0,0007522	0,003093	0,0134
Probe 2	0,128071	27,6					0,001776	0,01148	0,02502
Probe 3	0,145327	30					0,001635	0,01134	0,02604
Probe 4	0,153501	38,5					0,002761	0,01552	0,03005
Probe 5	0,119533	8,3					0,00093	0,004537	0,01415
x	0,13234404	21,856					0,00157084	0,009194	0,021732
s	0,01650347	14,5627154					0,00079742	0,00521438	0,007507794
Elimination der nicht berücksichtigten Proben, Strom- u. Ladungswerte flächenbezogen Probenanzahl: n=5									
	E _{corr} n. 2h	E(-6)	E(-5)	Ez	Ep-1	ip-1	Ep-2	ip-2	Rp
	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[µA/cm ²]	[mV]	[µA/cm ²]	[Ohm/cm ²]
Probe 1	-171,00	8,50	0,00	-252,90			790,20	7,27	174500,00
Probe 2	-225,00	-62,50	276,50	-330,30			804,10	38,71	17300,00
Probe 3	-195,00	-20,50	266,50	-288,70			813,00	32,19	81620,00
Probe 4	-186,00	-104,00	196,00	-167,20			849,60	44,67	41840,00
Probe 5	-217,00	-25,50	562,50	-321,60			810,60	24,17	22490,00
x	-198,80	-40,80	260,30	-272,14			813,50	29,40	67550,00
s	22,19	43,42	202,19	66,12			22,04	14,53	64909,05
	icorr	i(300 mV)	i(300+Ez)	βa	βc	Ages	Q1(Ez-300)	Q2(300-700)	Q3(700-1000)
	[nA/cm ²]	[µA/cm ²]	[µA/cm ²]			[C/cm ²]			
Probe 1	41,2692	5,1282	2,0551	189,50	33,00	0,1479	0,0010	0,0030	0,1438
Probe 2	187,6923	14,8718	1,8077	450,50	22,07	0,1645	0,0023	0,0124	0,1495
Probe 3	92,2051	16,9744	1,9103	298,90	27,98	0,1864	0,0021	0,0124	0,1718
Probe 4	721,0256	25,2564	7,9487	277,10	63,86	0,1971	0,0035	0,0163	0,1769
Probe 5	149,7436	5,7051	1,3615	580,80	22,55	0,1535	0,0012	0,0046	0,1474
x	238,39	13,59	3,02	359,36	33,89	0,17	0,00	0,01	0,16
s	275,50	8,41	2,77	155,42	17,34	0,02	0,00	0,01	0,02
	ΣQ1*Q2+Q3	i (500mV)					Q4(Ez-300)	Q5(Ez-700)	Q6(Ez-900)
	[C/cm ²]	[µA/cm ²]					[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]
Probe 1	0,1478	6,25641026					0,0010	0,0040	0,0172
Probe 2	0,1642	35,3846154					0,0023	0,0147	0,0321
Probe 3	0,1863	38,4615385					0,0021	0,0145	0,0334
Probe 4	0,1968	49,3589744					0,0035	0,0199	0,0385
Probe 5	0,1532	10,6410256					0,0012	0,0058	0,0181
x	0,16967185	28,0205128					0,0020139	0,01178718	0,027861538
s	0,02115829	18,670148					0,00102234	0,00668511	0,009625377
Q1-Q3: Auswertung nach Reclaru et al.									
Q4-Q6: Auswertung nach Maranche et al.									

Tabelle 17: Datenwerte Korrosionsprotokoll für Legierung Co-3 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Korrosionsmessung nach ISO 10271									
Datenwerte Korrosionsprotokoll			2h Ecorr + potentiodynamisch				V= 1mV/sec		
	Elektrolyt:	0,1 M NaCl-Milchsäure	A=		0,78 cm ²		E-Start:	-150mV=Ecorr	
	Legierung	Co-3	E-Ende: 1V						
	E _{corr} n. 2h	E(-6)	E(-5)	Ez	Ep-1	ip-1	Ep-2	ip-2	Rp
	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[µA]	[mV]	[µA]	[Ohm]
Probe 1	-239,00	-180,00	26,50	-338,10			826,80	99,04	14890,00
Probe 2	-163,00	-166,50	-36,00	-182,00			845,50	132,40	11120,00
Probe 3	-196,00	-41,50	131,50	-232,10			832,50	93,78	368600,00
Probe 4	-227,00	-133,50	113,00	-330,30			833,40	69,92	19260,00
Probe 5	-239,00	-163,00	40,00	-343,40			830,10	87,76	13850,00
x	-212,80	-136,90	55,00	-285,18	#DIV/0!	#DIV/0!	833,66	96,58	85544,00
s	32,93	55,96	68,07	73,64	#DIV/0!	#DIV/0!	7,09	22,83	158260,24
	icorr	i(300 mV)	i(300+Ez)	βa	βc	Ages	Q1(Ez-300)	Q2(300-700)	Q3(700-1000)
	[nA]	[µA]	[µA]			[C]	[C]	[C]	[C]
Probe 1	258,5000	122,60	5,40	259,00	26,89	0,2575	0,01489	0,04728	0,1948
Probe 2	2365,0000	139,20	36,10	239,60	123,00	0,2036	0,01821	0,06762	0,1963
Probe 3	41,6400	55,80	4,46	143,70	44,43	0,2247	0,005594	0,03523	0,1837
Probe 4	209,8000	58,30	3,06	369,50	25,52	0,1978	0,006317	0,02833	0,1629
Probe 5	235,5000	91,00	4,47	294,90	23,66	0,2077	0,01141	0,03785	0,1581
x	622,09	93,38	10,70	261,34	48,70	0,22	0,01	0,04	0,18
s	978,05	37,42	14,22	82,37	42,36	0,02	0,01	0,02	0,02
	ΣQ1*Q2+Q3	i (500mV)				Q4(Ez-300)	Q5(Ez-700)	Q6(Ez-900)	
	[C]	[µA]				[C]	[C]	[C]	
Probe 1	0,25697	114,2				0,01489	0,06229	0,09665	
Probe 2	0,28213	157				0,01821	0,08597	0,1232	
Probe 3	0,224524	91				0,005594	0,04088	0,0711	
Probe 4	0,197547	66,5				0,003317	0,0347	0,05972	
Probe 5	0,20736	89,2				0,01141	0,04934	0,07706	
x	0,2337062	103,58				0,0106842	0,054636	0,085546	
s	0,03525618	34,3017784				0,00622573	0,0203416	0,024943957	
Elimination der nicht berücksichtigten Proben, Strom- u. Ladungswerte flächenbezogen Probenanzahl: n=3 (1,4,5)									
	E _{corr} n. 2h	E(-6)	E(-5)	Ez	Ep-1	ip-1	Ep-2	ip-2	Rp
	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[µA/cm ²]	[mV]	[µA/cm ²]	[Ohm/cm ²]
Probe 1	-239,00	-180,00	26,50	-338,10			826,80	126,97	14890,00
Probe 2									
Probe 3									
Probe 4	-227,00	-133,50	113,00	-330,30			833,40	89,64	19260,00
Probe 5	-239,00	-163,00	40,00	-343,40			830,10	112,51	13850,00
x	-235,00	-158,83	59,83	-337,27			830,10	109,71	16000,00
s	6,93	23,53	46,54	6,59			3,30	18,82	2870,73
	icorr	i(300 mV)	i(300+Ez)	βa	βc	Ages	Q1(Ez-300)	Q2(300-700)	Q3(700-1000)
	[nA/cm ²]	[µA/cm ²]	[µA/cm ²]			[C/cm ²]			
Probe 1	331,4103	157,1795	6,9231	259,00	26,89	0,3301	0,0191	0,0606	0,2497
Probe 2									
Probe 3									
Probe 4	268,9744	74,7436	3,9231	369,50	25,52	0,2536	0,0081	0,0363	0,2088
Probe 5	301,9231	116,6667	5,7308	294,90	23,66	0,2663	0,0146	0,0485	0,2027
x	300,77	116,20	5,53	307,80	25,36	0,28	0,01	0,05	0,22
s	31,23	41,22	1,51	56,37	1,62	0,04	0,01	0,01	0,03
	ΣQ1*Q2+Q3	i (500mV)				Q4(Ez-300)	Q5(Ez-700)	Q6(Ez-900)	
	[C/cm ²]	[µA/cm ²]				[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	
Probe 1	0,3294	146,410256				0,0191	0,0799	0,1239	
Probe 2									
Probe 3									
Probe 4	0,2533	85,2564103				0,0043	0,0445	0,0766	
Probe 5	0,2658	114,358974				0,0146	0,0633	0,0988	
x	0,28285342	115,34188				0,01265684	0,06253419	0,09975641	
s	0,04084006	30,5887692				0,0076125	0,01769695	0,023687718	
Q1-Q3: Auswertung nach Reclaru et al.									
Q4-Q6: Auswertung nach Maranche et al.									

Tabelle 18: Datenwerte Korrosionsprotokoll für Legierung Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Korrosionsmessung nach ISO 10271										
Datenwerte Korrosionsprotokoll		2h Ecorr + potentiodynamisch					V= 1mV/sec			
	Elektrolyt:	0,1 M NaCl-Milchsäure			A=	0,78 cm ²		E-Start:	-150mV=Ecorr	
	Legierung	Co-4								
		E-Ende: 1V								
	E _{corr} n. 2h	E(-6)	E(-5)	Ez	Ep-1	ip-1	Ep-2	ip-2	Rp	
	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[µA]	[mV]	[µA]	[Ohm]	
Probe 1	-312,00	-333,50	-154,50	-347,70	380,30	28,75	856,10	100,00	7313,00	
Probe 2	-317,00	-331,50	-195,50	-342,80			859,80	144,60	7040,00	
Probe 3	-317,00	-336,50	-133,50	-349,20	39,99	16,39	841,50	107,30	7174,00	
Probe 4	-325,00	-338,50	-183,50	-348,90	-3,93	17,90	856,10	137,20	6633,00	
Probe 5	-286,00	-307,00	209,00	-361,70			830,10	74,20	9183,00	
x	-311,40	-329,40	-91,60	-350,06	138,79	21,01	848,72	112,66	7468,60	
s	14,94	12,81	169,79	7,00	210,31	6,74	12,56	28,68	991,48	
	icorr	i(300 mV)	i(300+Ez)	βa	βc	Ages	Q1(Ez-300)	Q2(300-700)	Q3(700-1000)	
	[nA]	[µA]	[µA]			[C]	[C]	[C]	[C]	
Probe 1	1375,0000	24,20	11,74	237,90	53,34	0,1982	0,008033	0,02537	0,1606	
Probe 2	1806,0000	51,30	17,59	269,10	59,92	0,2148	0,01323	0,04141	0,1549	
Probe 3	1618,0000	56,60	13,12	285,10	56,84	0,184	0,01297	0,03075	0,1356	
Probe 4	2077,0000	64,40	16,84	265,20	62,16	0,2004	0,01616	0,04153	0,1369	
Probe 5	0,8162	13,74	4,10	479,10	37,13	0,1603	0,003466	0,01236	0,1437	
x	1375,36	42,05	12,68	307,28	53,88	0,19	0,01	0,03	0,15	
s	810,25	21,89	5,39	97,54	9,93	0,02	0,01	0,01	0,01	
	ΣQ1*Q2+Q3	i (500mV)					Q4(Ez-300)	Q5(Ez-700)	Q6(Ez-900)	
	[C]	[µA]					[C]	[C]	[C]	
Probe 1	0,194003	74,7					0,008033	0,03343	0,06128	
Probe 2	0,20954	109,5					0,01323	0,05469	0,08936	
Probe 3	0,17932	78,1					0,01297	0,04378	0,07112	
Probe 4	0,19459	110,2					0,01616	0,05775	0,09117	
Probe 5	0,159526	27,3					0,003466	0,01584	0,03588	
x	0,1873958	79,96					0,0107718	0,041098	0,069762	
s	0,0188926	33,8794628					0,00501954	0,01707329	0,022716527	
Elimination der nicht berücksichtigten Proben, Strom- u. Ladungswerte flächenbezogen Probenanzahl: n=4 (1-4)										
	E _{corr} n. 2h	E(-6)	E(-5)	Ez	Ep-1	ip-1	Ep-2	ip-2	Rp	
	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[µA/cm ²]	[mV]	[µA/cm ²]	[Ohm/cm ²]	
Probe 1	-312,00	-333,50	-154,50	-347,70			856,10	128,21	7313,00	
Probe 2	-317,00	-331,50	-195,50	-342,80			859,80	185,38	7040,00	
Probe 3	-317,00	-336,50	-133,50	-349,20			841,50	137,56	7174,00	
Probe 4	-325,00	-338,50	-183,50	-348,90			856,10	175,90	6633,00	
Probe 5										
x	-317,75	-335,00	-166,75	-347,15			853,38	156,76	7040,00	
s	5,38	3,11	28,06	2,97			8,11	28,10	293,33	
	icorr	i(300 mV)	i(300+Ez)	βa	βc	Ages	Q1(Ez-300)	Q2(300-700)	Q3(700-1000)	
	[nA/cm ²]	[µA/cm ²]	[µA/cm ²]			[C/cm ²]				
Probe 1	1762,8205	31,0256	15,0513	237,90	53,34	0,2541	0,0103	0,0325	0,2059	
Probe 2	2315,3846	65,7692	22,5513	269,10	59,92	0,2754	0,0170	0,0531	0,1986	
Probe 3	2074,3590	72,5641	16,8205	285,10	56,84	0,2359	0,0166	0,0394	0,1738	
Probe 4	2662,8205	82,5641	21,5897	265,20	62,16	0,2569	0,0207	0,0532	0,1755	
Probe 5										
x	2203,85	62,98	19,00	264,33	58,07	0,26	0,02	0,04	0,19	
s	380,51	22,39	3,64	19,61	3,83	0,02	0,00	0,01	0,02	
	ΣQ1*Q2+Q3	i (500mV)					Q4(Ez-300)	Q5(Ez-700)	Q6(Ez-900)	
	[C/cm ²]	[µA/cm ²]					[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	
Probe 1	0,2487	95,7692308					0,0103	0,0429	0,0786	
Probe 2	0,2686	140,384615					0,0170	0,0701	0,1146	
Probe 3	0,2299	100,128205					0,0166	0,0561	0,0912	
Probe 4	0,2495	141,282051					0,0207	0,0740	0,1169	
Probe 5										
x	0,24918365	119,391026					0,0161516	0,06078526	0,100298077	
s	0,0158203	24,8260163					0,00432014	0,0142096	0,018566521	
Q1-Q3: Auswertung nach Reclaru et al.										
Q4-Q6: Auswertung nach Maranche et al.										

Analytische Auswertung der Elektrolytlösung des elektrochemischen Testes

Tabelle 19 Analytische Auswertung für Legierung Co-1 in 0,9 % NaCl bzw. 0,1 M NaCl-Milchsäure

Legierung:	Co-1											
Elektrolyt:	0,9 % NaCl											
Leg.-Element	Kobalt (Co)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5						
	Abnahme 1	248,72	225,64	222,44	253,85	305,77						
	Abnahme 2	250,64	226,28	221,79	254,49	298,08						
	Abnahme 3	247,44	232,05	214,74	253,21	300,00						
	Abnahme 4	251,28	226,28	217,31	249,36	296,15						
	Mittelwert	249,52	227,56	219,07	252,72	300,00						
	Standardabw. (s)	1,77	3,01	3,68	2,30	4,15						
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:	249,78				
							gemittelte Standardabweichung (s):	13,89				
Leg.-Element	Chrom (Cr)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5						
	Abnahme 1	69,87	51,28	60,26	60,26	85,26						
	Abnahme 2	70,51	51,28	59,62	60,26	80,77						
	Abnahme 3	70,51	53,85	55,77	60,26	80,77						
	Abnahme 4	70,51	51,92	57,69	57,69	80,77						
	Mittelwert	70,35	52,08	58,33	59,62	81,89						
	Standardabw. (s)	0,32	1,21	2,03	1,28	2,24						
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:	64,46				
							gemittelte Standardabweichung (s):	7,03				
Leg.-Element:		Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5						
	Abnahme 1											
	Abnahme 2											
	Abnahme 3											
	Abnahme 4											
	Mittelwert											
	Standardabw. (s)											
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:	#DIV/0!				
							gemittelte Standardabweichung (s):	0,00				
Elektrolyt	0,1 M NaCl-Milchsäure											
Leg.-Element	Kobalt (Co)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5						
	Abnahme 1	225,00	354,49	192,95	294,87	246,79						
	Abnahme 2	221,15	360,26	198,72	295,51	241,67						
	Abnahme 3	218,59	355,77	195,51	299,36	236,54						
	Abnahme 4	219,87	354,49	192,95	296,79	238,46						
	Mittelwert	221,15	356,25	195,03	296,63	240,87						
	Standardabw. (s)	2,77	2,74	2,74	1,98	4,48						
	Gesamt-Ergebnis						Mittelwert:	261,99				
							gemittelte Standardabweichung (s):	13,67				
Leg.-Element	Chrom (Cr)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5						
	Abnahme 1	69,23	107,69	58,97	90,38	75,00						
	Abnahme 2	67,95	110,26	60,90	90,38	72,44						
	Abnahme 3	66,67	108,97	59,62	92,31	71,79						
	Abnahme 4	67,31	108,33	58,97	91,67	72,44						
	Mittelwert	67,79	108,81	59,62	91,19	72,92						
	Standardabw. (s)	1,09	1,09	0,91	0,96	1,42						
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:	80,06				
							gemittelte Standardabweichung (s):	4,97				
Leg.-Element:		Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5						
	Abnahme 1											
	Abnahme 2											
	Abnahme 3											
	Abnahme 4											
	Mittelwert											
	Standardabw. (s)											
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:	#DIV/0!				
							gemittelte Standardabweichung (s):	0,00				

Anhang

Tabelle 20: Analytische Auswertung für Legierung Co-2 in 0,9 % NaCl bzw. 0,1 M NaCl-Milchsäure

Legierung:	Co-2							
Elektrolyt:	0,9 % NaCl							rot markierte Werte in Gesamt-Ergebnis n.b.
Leg.-Element	Kobalt (Co)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5		
	Abnahme 1	40,38	44,87	44,23	46,79	30,77		
	Abnahme 2	40,38	44,87	44,23	46,79	30,77		
	Abnahme 3	40,38	44,23	44,23	46,79	30,77		
	Abnahme 4	40,38	44,23	45,51	47,44	30,77		
	Mittelwert	40,38	44,55	44,55	46,96	30,77		
	Standardabw. (s)	0,00	0,37	0,64	0,32	0,00		
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:	41,44
							gemittelte Standardabweichung (s):	1,61
Leg.-Element	Chrom (Cr)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5		
	Abnahme 1	10,26	10,90	10,26	11,54	7,69		
	Abnahme 2	10,26	10,90	9,62	11,54	7,69		
	Abnahme 3	10,26	10,90	10,26	11,54	7,69		
	Abnahme 4	10,26	11,54	10,26	11,54	7,69		
	Mittelwert	10,26	11,06	10,10	11,54	7,69		
	Standardabw. (s)	0,00	0,32	0,32	0,00	0,00		
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:	10,13
							gemittelte Standardabweichung (s):	0,91
Leg.-Element:		Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5		
	Abnahme 1							
	Abnahme 2							
	Abnahme 3							
	Abnahme 4							
	Mittelwert							
	Standardabw. (s)							
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:	#DIV/0!
							gemittelte Standardabweichung (s):	0,00
Elektrolyt	0,1 M NaCl-Milchsäure							
Leg.-Element	Kobalt (Co)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5		
	Abnahme 1	23,72	28,85	28,85	296,15	23,72		
	Abnahme 2	23,72	28,85	28,85	289,10	23,72		
	Abnahme 3	23,72	28,85	28,85	293,59	23,72		
	Abnahme 4	23,72	28,85	28,85	285,90	23,72		
	Mittelwert	23,72	28,85	28,85	291,19	23,72		
	Standardabw. (s)	0,00	0,00	0,00	4,57	0,00		
	Gesamt-Ergebnis						Mittelwert:	26,28
							gemittelte Standardabweichung (s):	0,00
Leg.-Element	Chrom (Cr)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5		
	Abnahme 1	6,41	7,69	7,69	100,00	6,41		
	Abnahme 2	6,41	7,69	7,69	98,72	6,41		
	Abnahme 3	6,41	7,69	7,69	98,72	6,41		
	Abnahme 4	6,41	7,69	7,69	97,44	6,41		
	Mittelwert	6,41	7,69	7,69	98,72	6,41		
	Standardabw. (s)	0,00	0,00	0,00	1,05	0,00		
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:	26,28
							gemittelte Standardabweichung (s):	0,00
Leg.-Element:	Wolfram (W)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5		
	Abnahme 1				29,49			
	Abnahme 2				29,49			
	Abnahme 3				30,13			
	Abnahme 4				28,85			
	Mittelwert	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	29,49	#DIV/0!		
	Standardabw. (s)	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	0,52	#DIV/0!		
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:	29,49
							gemittelte Standardabweichung (s):	0,52

Anhang

Tabelle 21: Analytische Auswertung für Legierung Co-3 in 0,9 % NaCl bzw. 0,1 M NaCl-Milchsäure

Legierung:	Co-3							
Elektrolyt:	0,9 % NaCl							rot markierte Werte in Gesamt-Ergebnis n.b.
Leg.-Element	Kobalt (Co)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5		
	Abnahme 1	1053,85	101,28	108,33	89,74	76,92		
	Abnahme 2	1050,00	99,36	107,69	89,10	77,56		
	Abnahme 3	1029,49	98,72	107,69	89,10	76,92		
	Abnahme 4	1048,72	98,08	106,41	89,74	76,92		
	Mittelwert	1045,51	99,36	107,53	89,42	77,08		
	Standardabw. (s)	10,90	1,38	0,81	0,37	0,32		
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:	93,35
							gemittelte Standardabweichung (s):	3,35
Leg.-Element	Chrom (Cr)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5		
	Abnahme 1	189,10	10,26	9,62	10,26	8,33		
	Abnahme 2	191,67	9,62	8,97	10,26	8,33		
	Abnahme 3	185,26	8,97	8,97	10,26	8,33		
	Abnahme 4	189,10	8,97	8,97	10,26	8,33		
	Mittelwert	188,78	9,46	9,13	10,26	8,33		
	Standardabw. (s)	2,64	0,61	0,32	0,00	0,00		
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:	9,29
							gemittelte Standardabweichung (s):	1,38
Leg.-Element:	Molybdän (Mo)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5		
	Abnahme 1	42,95						
	Abnahme 2	44,87						
	Abnahme 3	43,59						
	Abnahme 4	44,23						
	Mittelwert	43,91						
	Standardabw. (s)	0,83						
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:	43,91
							gemittelte Standardabweichung (s):	0,83
Elektrolyt	0,1 M NaCl-Milchsäure							
Leg.-Element	Kobalt (Co)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5		
	Abnahme 1	67,31	62,18	60,90	47,44	55,13		
	Abnahme 2	69,23	62,18	60,90	46,15	57,05		
	Abnahme 3	68,59	62,82	58,97	47,44	56,41		
	Abnahme 4	69,23	63,46	60,26	47,44	57,05		
	Mittelwert	68,59	62,66	60,26	47,12	56,41		
	Standardabw. (s)	0,91	0,61	0,91	0,64	0,91		
	Gesamt-Ergebnis						Mittelwert:	59,01
							gemittelte Standardabweichung (s):	3,61
Leg.-Element	Chrom (Cr)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5		
	Abnahme 1	12,82	10,26	11,54	7,69	8,97		
	Abnahme 2	12,82	10,26	11,54	7,69	8,97		
	Abnahme 3	12,82	10,26	10,26	7,69	8,97		
	Abnahme 4	12,82	10,26	11,54	7,69	8,97		
	Mittelwert	12,82	10,26	11,22	7,69	8,97		
	Standardabw. (s)	0,00	0,00	0,64	0,00	0,00		
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:	10,19
							gemittelte Standardabweichung (s):	1,28
Leg.-Element:		Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5		
	Abnahme 1							
	Abnahme 2							
	Abnahme 3							
	Abnahme 4							
	Mittelwert							
	Standardabw. (s)							
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:	#DIV/0!
							gemittelte Standardabweichung (s):	0,00

Anhang

Tabelle 22: Analytische Auswertung für Legierung Co-4 in 0,9 % NaCl bzw. 0,1 M NaCl-Milchsäure

Legierung:	Co-4								
Elektrolyt:	0,9 % NaCl							rot markierte Werte in Gesamt-Ergebnis n.b.	
Leg.-Element	Kobalt (Co)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5			
	Abnahme 1	41,67	51,28		99,36	49,36			
	Abnahme 2	41,67	51,92		98,08	49,36			
	Abnahme 3	41,67	50,64		97,44	48,72			
	Abnahme 4	41,67	51,28		97,44	48,08			
	Mittelwert	41,67	51,28		98,08	48,88			
	Standardabw. (s)	0,00	0,52		0,91	0,61			
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:	59,98	
							gemittelte Standardabweichung (s):	2,42	
Leg.-Element	Chrom (Cr)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5			
	Abnahme 1	0,00	0,00	272,44	0,00	0,00			
	Abnahme 2	0,00	0,00	271,15	0,00	0,00			
	Abnahme 3	0,00	0,00	269,23	0,00	0,00			
	Abnahme 4	0,00	0,00	266,03	0,00	0,00			
	Mittelwert	0,00	0,00	269,71	0,00	0,00			
	Standardabw. (s)	0,00	0,00	2,79	0,00	0,00			
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:		
							gemittelte Standardabweichung (s):		
Leg.-Element:	Wolfram (W)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5			
	Abnahme 1	0,00	0,00	33,97	0,00	0,00			
	Abnahme 2	0,00	0,00	34,62	0,00	0,00			
	Abnahme 3	0,00	0,00	35,26	0,00	0,00			
	Abnahme 4	0,00	0,00	34,62	0,00	0,00			
	Mittelwert	0,00	0,00	34,62	0,00	0,00			
	Standardabw. (s)	0,00	0,00	0,52	0,00	0,00			
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:		
							gemittelte Standardabweichung (s):		
Elektrolyt	0,1 M NaCl-Milchsäure								
Leg.-Element	Kobalt (Co)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5			
	Abnahme 1	47,44	59,62	47,44	58,33	41,03			
	Abnahme 2	47,44	57,69	46,15	57,05	41,03			
	Abnahme 3	46,79	59,62	47,44	58,33	41,03			
	Abnahme 4	46,79	58,97	47,44	58,33	41,03			
	Mittelwert	47,12	58,97	47,12	58,01	41,03			
	Standardabw. (s)	0,37	0,91	0,64	0,64	0,00			
	Gesamt-Ergebnis						Mittelwert:	50,45	
							gemittelte Standardabweichung (s):	2,67	
Leg.-Element	Chrom (Cr)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5			
	Abnahme 1	6,41	7,69	0,00	7,69	7,69			
	Abnahme 2	6,41	7,69	0,00	7,69	7,05			
	Abnahme 3	6,41	7,69	0,00	7,69	7,69			
	Abnahme 4	6,41	7,69	0,00	7,69	6,41			
	Mittelwert	6,41	7,69	0,00	7,69	7,21			
	Standardabw. (s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,61			
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:	7,25	
							gemittelte Standardabweichung (s):	1,23	
Leg.-Element:	Wolfram (W)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5			
	Abnahme 1	7,05	10,90	8,33	11,54	7,69			
	Abnahme 2	7,05	10,26	8,33	11,54	7,69			
	Abnahme 3	7,05	10,90	8,33	11,54	7,69			
	Abnahme 4	7,05	10,90	8,33	11,54	7,69			
	Mittelwert	7,05	10,74	8,33	11,54	7,69			
	Standardabw. (s)	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00			
	Gesamt-Ergebnis:						Mittelwert:	9,07	
							gemittelte Standardabweichung (s):	0,64	

Massenverluste der Legierungselemente in den Elektrolyten 0,9 % NaCl bzw. 0,1 M NaCl-Milchsäure

Tabelle 23: Massenverluste der Elemente der Legierung Co-1 in 0,9 % NaCl

Berechnung Massenverlust									
Co-1 in 0,9 % NaCl									
Verwendete Konstanten:									
		Co	Cr	W	Mo	Mn	Si	Nb	
Molmasse:	g [*] mol ⁻¹	58,933	51,996	183,85	95,94	54,94	28,09	92,906	
Wertigkeit		2	3	6	6	2	4	5	
Oxidationszahlen		-1;0;2;3	0;2;3;6	0,2,3;4;5;6	0;2;3;4;5;6	-1;0;2;3;4;6;7	-4;4	3;4	
	Faraday-Konstante C [*] mol ⁻¹	96485,338							
Werte flächenbezogen									
	A _{ges}	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	ΣQ1,Q2,Q3	
	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	
Probe 1	1,425641	0,1096923	0,6101282	0,7028205	0,1096923	0,7207692	1,0735897	1,42264103	
Probe 2	1,5871795	0,1564103	0,684359	0,7437179	0,1564103	0,8420513	1,2319231	1,58448718	
Probe 3	1,3474359	0,1167051	0,5452564	0,6825641	0,1167051	0,6629487	0,9934615	1,34452564	
Probe 4	1,6717949	0,1984615	0,7384615	0,7308974	0,1984615	0,9382051	1,3512821	1,66782051	
Probe 5	1,7230769	0,1737179	0,7844872	0,7620513	0,1737179	0,9594872	1,3948718	1,72025641	
X	1,5510256	0,1509974	0,6725385	0,7244103	0,1509974	0,8246923	1,2090256	1,54794615	
S	0,1602061	0,0376843	0,0963248	0,0318156	0,0376843	0,1306877	0,173285	0,16006031	
Elimination der nicht berücksichtigten Proben									
	A _{ges}	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	ΣQ1,Q2,Q3	
	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	
Probe 1									
Probe 2	1,5871795	0,1564103	0,684359	0,7437179	0,1564103	0,8420513	1,2319231	1,58448718	
Probe 3	1,3474359	0,1167051	0,5452564	0,6825641	0,1167051	0,6629487	0,9934615	1,34452564	
Probe 4	1,6717949	0,1984615	0,7384615	0,7308974	0,1984615	0,9382051	1,3512821	1,66782051	
Probe 5	1,7230769	0,1737179	0,7844872	0,7620513	0,1737179	0,9594872	1,3948718	1,72025641	
X	1,5823718	0,1613237	0,688141	0,7298077	0,1613237	0,8506731	1,2428846	1,57927244	
S	0,1663454	0,0343889	0,1036743	0,0339916	0,0343889	0,1351754	0,1799835	0,16618313	
Berechneter Massenverlust									
	Δm A _{ges}	Δm Q1	Δm Q2	Δm Q3	Δm Q4	Δm Q5	Δm Q6	Δm ΣQ1,Q2,Q3	
	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	
Co	483,254	49,268	210,157	222,882	49,268	259,794	379,575	482,308	
Cr	284,247	28,979	123,613	131,098	28,979	152,809	223,264	283,690	
W	502,527	51,233	218,539	231,771	51,233	270,155	394,713	501,543	
Mo	262,238	26,735	114,042	120,947	26,735	140,978	205,977	261,724	
Mn	450,511	45,930	195,918	207,781	45,930	242,192	353,857	449,629	
Si	115,170	11,742	50,085	53,118	11,742	61,915	90,461	114,944	
Nb	304,734	31,068	132,523	140,547	31,068	163,823	239,355	304,137	
Massenverlust auf Legierungsanteil reduziert									
	Legierungs-Anteil	Δm Anteil	Δm Q1 Anteil	Δm Q2 Anteil	Δm Q3 Anteil	Δm Q4 Anteil	Δm Q5 Anteil	Δm Q6 Anteil	Δm ΣQ1,Q2,Q3 Anteil
	%	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]
Co	71	343,111	34,980	149,212	158,246	34,980	184,454	269,499	342,439
Cr	28	79,589	8,114	34,612	36,707	8,114	42,787	62,514	79,433
W	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mo	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	0,5	2,253	0,230	0,980	1,039	0,230	1,211	1,769	2,248
Si	0,5	0,576	0,059	0,250	0,266	0,059	0,310	0,452	0,575
Nb	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Massenverlust-Vergleich									
	Legierungs-Anteil	analytisch*	analytisch zu berechnet				analytisch /		analytisch /
	%	[μg/cm ²]	Δm A _{ges}	Δm Anteil	Ag _{es}		Δm A _{ges}	Ag _{es}	Δm Anteil
			[μg/cm ²]	[μg/cm ²]					
Co	71	249,776	483,254	343,111		0,52		0,73	
Cr	28	64,455	284,247	79,589		0,23		0,81	
W	0		502,527	0,000		0,00		#DIV/0!	
Mo	0		262,238	0,000		0,00		#DIV/0!	
Mn	0,5		450,511	2,253		0,00		0,00	
Si	0,5		115,170	0,576		0,00		0,00	
Nb	0		304,734	0,000		0,00		#DIV/0!	

* aus Analyse ICP-OES

Tabelle 24: Massenverluste der Elemente der Legierung Co-2 in 0,9 % NaCl

Berechnung Massenverlust									
Co-2 in 0,9 % NaCl									
Verwendete Konstanten:									
		Co	Cr	W	Mo	Mn	Si	Nb	
Molmasse:	g* ⁻¹ mol	58,933	51,996	183,85	95,94	54,94	28,09	92,906	
Wertigkeit		2	3	6	6	2	4	5	
Oxidationszahlen		-1;0;2;3	0;2;3;6	0,2;3;4;5;6	0;2;3;4;5;6	1;0;2;3;4;6;7	-4;4	3;4	
	Faraday-Konstante	C* ⁻¹ mol		96485,338					
Werte flächenbezogen									
	A _{ges}	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	ΣQ1, Q2, Q3	
	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]
Probe 1	0,2994872	0,007409	0,0337692	0,2580769	0,007409	0,0412564	0,0919103	0,29925513	
Probe 2	0,3466667	0,0128462	0,0504231	0,2830769	0,0128462	0,0633846	0,1212308	0,34634615	
Probe 3	0,3151282	0,0142949	0,0507436	0,2497436	0,0147436	0,0651538	0,1224359	0,31478205	
Probe 4	0,3253846	0,0132436	0,0598462	0,2521795	0,0132436	0,0732179	0,1315385	0,32526923	
Probe 5	0,2325641	0,0056923	0,0250769	0,2016667	0,0056923	0,0308333	0,0713333	0,2324359	
X	0,3038462	0,0106972	0,0439718	0,2489487	0,0107869	0,0547692	0,1076897	0,30361769	
S	0,0433731	0,00387	0,0141473	0,0295581	0,003978	0,0178742	0,0252009	0,0433158	
Elimination der nicht berücksichtigten Proben									
	A _{ges}	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	ΣQ1, Q2, Q3	
	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]
Probe 1	0,2994872	0,007409	0,0337692	0,2580769	0,007409	0,0412564	0,0919103	0,29925513	
Probe 2									
Probe 3	0,3151282	0,0142949	0,0507436	0,2497436	0,0147436	0,0651538	0,1224359	0,31478205	
Probe 4	0,3253846	0,0132436	0,0598462	0,2521795	0,0132436	0,0732179	0,1315385	0,32526923	
Probe 5									
X	0,3133333	0,0116491	0,0481197	0,2533333	0,0117987	0,0598761	0,1152949	0,31310214	
S	0,0130417	0,0037095	0,013235	0,0042848	0,0038749	0,0166216	0,0207568	0,01308816	
Berechneter Massenverlust									
	Δm A _{ges}	Δm Q1	Δm Q2	Δm Q3	Δm Q4	Δm Q5	Δm Q6	Δm	ΣQ1,Q2,Q3
	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]
Co	95,692	3,558	14,696	77,368	3,603	18,286	35,211	95,621	
Cr	56,285	2,093	8,644	45,507	2,119	10,756	20,711	56,244	
W	99,508	3,700	15,282	80,453	3,747	19,015	36,615	99,434	
Mo	51,927	1,931	7,975	41,984	1,955	9,923	19,107	51,889	
Mn	89,208	3,317	13,700	72,126	3,359	17,047	32,825	89,142	
Si	22,805	0,848	3,502	18,438	0,859	4,358	8,392	22,789	
Nb	60,342	2,243	9,267	48,787	2,272	11,531	22,204	60,297	
Massenverlust auf Legierungsanteil reduziert									
	Legierungs-Anteil	Δm Anteil	Δm Q1 Anteil	Δm Q2 Anteil	Δm Q3 Anteil	Δm Q4 Anteil	Δm Q5 Anteil	Δm Q6 Anteil	Δm ΣQ1,Q2,Q3 Anteil
	%	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]
Co	65	62,200	2,312	9,552	50,289	2,342	11,886	22,887	62,154
Cr	28	15,760	0,586	2,420	12,742	0,593	3,012	5,799	15,748
W	6	5,970	0,222	0,917	4,827	0,225	1,141	2,197	5,966
Mo	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	0,5	0,446	0,017	0,068	0,361	0,017	0,085	0,164	0,446
Si	0,5	0,114	0,004	0,018	0,092	0,004	0,022	0,042	0,114
Nb	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Massenverlust-Vergleich									
	Legierungs-Anteil	analytisch*	analytisch / Δm A _{ges}	analytisch / Δm Anteil	analytisch / Δm A _{ges}	analytisch / Δm Anteil	analytisch / Δm A _{ges}	analytisch / Δm Anteil	analytisch / Δm Anteil
	%	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]
Co	65	41,442	95,692	62,200	0,43	0,67			
Cr	28	10,128	56,285	15,760	0,18	0,64			
W	6	0,000	99,508	5,970	0,00	0,00			
Mo	0		51,927	0,000	0,00	#DIV/0!			
Mn	0,5		89,208	0,446	0,00	0,00			
Si	0,5		22,805	0,114	0,00	0,00			
Nb	0		60,342	0,000	0,00	#DIV/0!			

* aus Analyse ICP-OES

Anhang

Tabelle 25: Massenverluste der Elemente der Legierung Co-3 in 0,9 % NaCl

Berechnung Massenverlust									
Co-3 in 0,9 % NaCl									
Verwendete Konstanten:									
		Co	Cr	W	Mo	Mn	Si	Nb	
Molmasse:	g*mol ⁻¹	58,933	51,996	183,85	95,94	54,94	28,09	92,906	
Wertigkeit		2	3	6	6	2	4	5	
Oxidationszahlen		-1;0;2;3	0;2;3;6	0,2,3;4;5;6	0;2;3;4;5;6	-	1;0;2;3;4;6;7	-4;4	3;4
Faraday-Konstante C*mol ⁻¹			96485,338						
Werte flächenbezogen									
	A _{ges}	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	ΣQ1, Q2, Q3	
	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]					
Probe 1	0,3910256	0	0	0	0	0	0	0	0
Probe 2	0,5287179	0,0515769	0,1073077	0,3691026	0,0515769	0,1591026	0,2775641	0,52798718	0,52798718
Probe 3	0,5319231	0,0338077	0,1034615	0,3941026	0,0338077	0,1374359	0,2574359	0,53137179	0,53137179
Probe 4	0,5261538	0,0328333	0,0958333	0,3866667	0,0328333	0,1288462	0,2374359	0,51533333	0,51533333
Probe 5	0,4439744	0,027641	0,0772308	0,3385897	0,027641	0,1050256	0,2025641	0,44346154	0,44346154
X	0,484359	0,0364647	0,0959583	0,3721154	0,0364647	0,1326026	0,24375	0,40363077	0,40363077
S	0,0638727	0,0104321	0,0133647	0,0246862	0,0104321	0,0223622	0,0319731	0,22845352	0,22845352
Elimination der nicht berücksichtigten Proben									
	A _{ges}	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	ΣQ1, Q2, Q3	
	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]					
Probe 1									
Probe 2	0,5287179	0,0515769	0,1073077	0,3691026	0,0515769	0,1591026	0,2775641	0,52798718	0,52798718
Probe 3	0,5319231	0,0338077	0,1034615	0,3941026	0,0338077	0,1374359	0,2574359	0,53137179	0,53137179
Probe 4	0,5261538	0,0328333	0,0958333	0,3866667	0,0328333	0,1288462	0,2374359	0,51533333	0,51533333
Probe 5	0,4439744	0,027641	0,0772308	0,3385897	0,027641	0,1050256	0,2025641	0,44346154	0,44346154
X	0,5076923	0,0364647	0,0959583	0,3721154	0,0364647	0,1326026	0,24375	0,50453846	0,50453846
S	0,0425441	0,0104321	0,0133647	0,0246862	0,0104321	0,0223622	0,0319731	0,04129887	0,04129887
Berechneter Massenverlust									
	Δm A _{ges}	Δm Q1	Δm Q2	Δm Q3	Δm Q4	Δm Q5	Δm Q6	Δm	ΣQ1,Q2,Q3
	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]					
Co	155,049	11,136	29,306	113,644	11,136	40,497	74,441	154,085	154,085
Cr	91,199	6,550	17,237	66,844	6,550	23,820	43,786	90,632	90,632
W	161,232	11,580	30,474	118,176	11,580	42,112	77,410	160,231	160,231
Mo	84,137	6,043	15,903	61,669	6,043	21,976	40,395	83,614	83,614
Mn	144,543	10,382	27,320	105,944	10,382	37,753	69,397	143,645	143,645
Si	36,951	2,654	6,984	27,084	2,654	9,651	17,741	36,722	36,722
Nb	97,772	7,022	18,480	71,662	7,022	25,537	46,942	97,164	97,164
Massenverlust auf Legierungsanteil reduziert									
	Legierungs-Anteil	Δm Anteil	Δm Q1 Anteil	Δm Q2 Anteil	Δm Q3 Anteil	Δm Q4 Anteil	Δm Q5 Anteil	Δm Q6 Anteil	Δm
	%	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	ΣQ1,Q2,Q3 Anteil				
Co	71	110,084	7,907	20,807	80,687	7,907	28,753	52,853	109,401
Cr	20	18,240	1,310	3,447	13,369	1,310	4,764	8,757	18,126
W	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mo	7	5,890	0,423	1,113	4,317	0,423	1,538	2,828	5,853
Mn	0,5	0,723	0,052	0,137	0,530	0,052	0,189	0,347	0,718
Si	0,5	0,185	0,013	0,035	0,135	0,013	0,048	0,089	0,184
Nb	1	0,978	0,070	0,185	0,717	0,070	0,255	0,469	0,972
Massenverlust-Vergleich analytisch zu berechnet									
	Legierungs-Anteil	analytisch*	Δm A _{ges}	Δm Anteil		analytisch / Δm A _{ges}		analytisch / Δm Anteil	
	%	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]					
Co	71	93,349	155,049	110,084		0,60		0,85	
Cr	20	9,295	91,199	18,240		0,10		0,51	
W	0		161,232	0,000		0,00		#DIV/0!	
Mo	7	43,910	84,137	5,890		0,52		7,46	
Mn	0,5		144,543	0,723		0,00		0,00	
Si	0,5		36,951	0,185		0,00		0,00	
Nb	1		97,772	0,978		0,00		0,00	

* aus Analyse ICP-OES

Tabelle 26: Massenverluste der Elemente der Legierung Co-4 in 0,9 % NaCl

Berechnung Massenverlust									
Co-4 in 0,9 % NaCl									
Verwendete Konstanten:									
		Co	Cr	W	Mo	Mn	Si	Nb	
Molmasse:	g* ^{mol} ⁻¹	58,933	51,996	183,85	95,94	54,94	28,09	92,906	
Wertigkeit		2	3	6	6	-	4	5	
Oxidationszahlen		-1;0;2;3	0;2;3;6	0,2;3;4;5;6	0;2;3;4;5;6	1;0;2;3;4;6;7	-4;4	3;4	
Faraday-Konstante C* ^{mol} ⁻¹		96485,338							
Werte flächenbezogen									
	A _{ges}	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	ΣQ1, Q2, Q3	
	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]
Probe 1	0,2448718	0,0079859	0,0449231	0,1916667	0,0079859	0,0529359	0,1181282	0,24457564	
Probe 2	0,2848718	0,0110628	0,0627949	0,210641	0,0110628	0,0738974	0,1510256	0,28449872	
Probe 3	0,2907692	0,0184103	0,0742821	0,1975641	0,0184103	0,0927949	0,1665385	0,29025641	
Probe 4	0,349359	0,0190256	0,1052564	0,2244872	0,0190256	0,124359	0,2269231	0,34876923	
Probe 5	0,2510256	0,0134103	0,0580769	0,1791026	0,0134103	0,0715513	0,1332051	0,25058974	
X	0,2841795	0,013979	0,0690667	0,2006923	0,013979	0,0831077	0,1591641	0,28373795	
S	0,041643	0,0047394	0,0228031	0,0174824	0,0047394	0,0270381	0,0420408	0,04154704	
Elimination der nicht berücksichtigten Proben									
	A _{ges}	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	ΣQ1, Q2, Q3	
	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]
Probe 1	0,2448718	0,0079859	0,0449231	0,1916667	0,0079859	0,0529359	0,1181282	0,24457564	
Probe 2	0,2848718	0,0110628	0,0627949	0,210641	0,0110628	0,0738974	0,1510256	0,28449872	
Probe 3	0,2907692	0,0184103	0,0742821	0,1975641	0,0184103	0,0927949	0,1665385	0,29025641	
Probe 4	0,349359	0,0190256	0,1052564	0,2244872	0,0190256	0,124359	0,2269231	0,34876923	
Probe 5	0,2510256	0,0134103	0,0580769	0,1791026	0,0134103	0,0715513	0,1332051	0,25058974	
X	0,2841795	0,013979	0,0690667	0,2006923	0,013979	0,0831077	0,1591641	0,28373795	
S	0,041643	0,0047394	0,0228031	0,0174824	0,0047394	0,0270381	0,0420408	0,04154704	
Berechneter Massenverlust									
	Δm A _{ges}	Δm Q1	Δm Q2	Δm Q3	Δm Q4	Δm Q5	Δm Q6	Δm	ΣQ1,Q2,Q3
	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]
Co	86,788	4,269	21,093	61,291	4,269	25,381	48,609	86,653	
Cr	51,048	2,511	12,407	36,051	2,511	14,929	28,591	50,969	
W	90,249	4,439	21,934	63,736	4,439	26,393	50,547	90,109	
Mo	47,096	2,317	11,446	33,260	2,317	13,773	26,377	47,022	
Mn	80,908	3,980	19,664	57,138	3,980	23,661	45,315	80,782	
Si	20,683	1,017	5,027	14,607	1,017	6,049	11,584	20,651	
Nb	54,727	2,692	13,301	38,649	2,692	16,005	30,652	54,642	
Massenverlust auf Legierungsanteil reduziert									
	Legierungs- Anteil	Δm Anteil	Δm Q1 Anteil	Δm Q1 Anteil	Δm Q3 Anteil	Δm Q4 Anteil	Δm Q5 Anteil	Δm Q6 Anteil	Δm ΣQ1,Q2,Q3 Anteil
	%	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]
Co	64	55,544	2,732	13,499	39,226	2,732	16,244	31,109	55,458
Cr	20	10,210	0,502	2,481	7,210	0,502	2,986	5,718	10,194
W	14	12,635	0,622	3,071	8,923	0,622	3,695	7,077	12,615
Mo	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	0,5	0,405	0,020	0,098	0,286	0,020	0,118	0,227	0,404
Si	0,5	0,103	0,005	0,025	0,073	0,005	0,030	0,058	0,103
Nb	1	0,547	0,027	0,133	0,386	0,027	0,160	0,307	0,546
Massenverlust-Vergleich									
	Legierungs- Anteil	analytisch*	analytisch zu berechnet			analytisch /		analytisch /	
	%	[μg/cm ²]	Δm A _{ges}	Δm Anteil	Δm Anteil	Δm Anteil	Δm A _{ges}	Δm Anteil	Δm Anteil
Co	64	59,976	86,788	55,544	55,544	55,544	0,69	0,93	0,93
Cr	20	0,000	51,048	10,210	10,210	10,210	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
W	14	9,071	90,249	12,635	12,635	12,635	0,10	1,39	1,39
Mo	0		47,096	0,000	0,000	0,000	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
Mn	0,5		80,908	0,405	0,405	0,405	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
Si	0,5		20,683	0,103	0,103	0,103	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
Nb	1		54,727	0,547	0,547	0,547	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!

* aus Analyse ICP-OES

Anhang

Tabelle 27: Massenverluste der Elemente der Legierung Co-1 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Berechnung Massenverlust									
Co-1 in 0,1 M NaCl-Milchsäure									
Verwendete Konstanten:									
		Co	Cr	W	Mo	Mn	Si	Nb	
Molmasse:	g ⁺ mol ⁻¹	58,933	51,996	183,85	95,94	54,94	28,09	92,906	
Wertigkeit		2	3	6	6	2	4	5	
Oxidationszahlen		-1;0;2;3	0;2;3;6	0,2;3;4;5;6	0;2;3;4;5;6	-1;0;2;3;4;6;7	-4;4	3;4	
	Faraday-Konstante	C*mol ⁻¹	96485,338						
Werte flächenbezogen									
	A _{ges}	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	ΣQ1,Q2,Q3	
	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]
Probe 1	1,1037179	0,0390897	0,4685897	0,5925641	0,0390897	0,5094872	0,8274359	1,1002436	
Probe 2	1,5769231	0,1009103	0,7084615	0,7675641	0,1009103	0,8103846	1,2752564	1,5769359	
Probe 3	0,9592308	0,0325	0,3728205	0,5519231	0,0325	0,4057692	0,7180769	0,9572436	
Probe 4	1,424359	0,1321795	0,650641	0,6382051	0,1321795	0,7838462	1,1762821	1,4210256	
Probe 5	1,1948718	0,0834359	0,5121795	0,5966667	0,0834359	0,5964103	0,9371795	1,1922821	
X	1,2518205	0,0776231	0,5425385	0,6293846	0,0776231	0,6211795	0,9868462	1,2495462	
S	0,2481166	0,0420517	0,1363918	0,083063	0,0420517	0,174463	0,2340842	0,2487973	
Elimination der nicht berücksichtigten Proben									
	A _{ges}	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	ΣQ1,Q2,Q3	
	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]
Probe 1	1,1037179	0,0390897	0,4685897	0,5925641	0,0390897	0,5094872	0,8274359	1,1002436	
Probe 2	1,5769231	0,1009103	0,7084615	0,7675641	0,1009103	0,8103846	1,2752564	1,5769359	
Probe 3	0,9592308	0,0325	0,3728205	0,5519231	0,0325	0,4057692	0,7180769	0,9572436	
Probe 4	1,424359	0,1321795	0,650641	0,6382051	0,1321795	0,7838462	1,1762821	1,4210256	
Probe 5	1,1948718	0,0834359	0,5121795	0,5966667	0,0834359	0,5964103	0,9371795	1,1922821	
X	1,2518205	0,0776231	0,5425385	0,6293846	0,0776231	0,6211795	0,9868462	1,2495462	
S	0,2481166	0,0420517	0,1363918	0,083063	0,0420517	0,174463	0,2340842	0,2487973	
Berechneter Massenverlust									
	Δm A _{ges}	Δm Q1	Δm Q2	Δm Q3	Δm Q4	Δm Q5	Δm Q6	Δm	
	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]
Co	382,304	23,706	165,691	192,213	23,706	189,707	301,382	381,610	
Cr	224,869	13,944	97,458	113,059	13,944	111,585	177,271	224,460	
W	397,551	24,651	172,299	199,879	24,651	197,273	313,401	396,829	
Mo	207,458	12,864	89,912	104,305	12,864	102,945	163,545	207,081	
Mn	356,401	22,100	154,464	179,190	22,100	176,854	280,961	355,754	
Si	91,111	5,650	39,488	45,809	5,650	45,211	71,826	90,946	
Nb	241,076	14,949	104,482	121,207	14,949	119,627	190,047	240,638	
Massenverlust auf Legierungsanteil reduziert									
	Legierungs-Anteil	Δm Anteil	Δm Q1 Anteil	Δm Q2 Anteil	Δm Q3 Anteil	Δm Q4 Anteil	Δm Q5 Anteil	Δm Q6 Anteil	Δm ΣQ1,Q2,Q3
	%	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]					
Co	71	271,436	16,831	117,640	136,471	16,831	134,692	213,981	270,943
Cr	28	62,963	3,904	27,288	31,656	3,904	31,244	49,636	62,849
W	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mo	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	0,5	1,782	0,110	0,772	0,896	0,110	0,884	1,405	1,779
Si	0,5	0,456	0,028	0,197	0,229	0,028	0,226	0,359	0,455
Nb	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Massenverlust-Vergleich									
	Legierungs-Anteil	analytisch*		Δm A _{ges}	Δm Anteil		analytisch / Δm A _{ges}		analytisch / Δm Anteil
	%	[μg/cm ²]		[μg/cm ²]	[μg/cm ²]				
Co	71	261,99		382,304	271,436		0,69		0,97
Cr	28	80,064		224,869	62,963		0,36		1,27
W	0			397,551	0,000		0,00		#DIV/0!
Mo	0			207,458	0,000		0,00		#DIV/0!
Mn	0,5			356,401	1,782		0,00		0,00
Si	0,5			91,111	0,456		0,00		0,00
Nb	0			241,076	0,000		0,00		#DIV/0!

* aus Analyse ICP-OES

Tabelle 28: Massenverluste der Elemente der Legierung Co-2 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Berechnung Massenverlust									
Co-2 in 0,1 M NaCl-Milchsäure									
Verwendete Konstanten:									
		Co	Cr	W	Mo	Mn	Si	Nb	
Molmasse:	g* ^{mol} ⁻¹	58,933	51,996	183,85	95,94	54,94	28,09	92,906	
Wertigkeit		2	3	6	6	2	4	5	
Oxidationszahlen		-1;0;2;3	0;2;3;6	0,2;3;4;5;6	0;2;3;4;5;6	1;0;2;3;4;6;7	-4;4	3;4	
Faraday-Konstante C* ^{mol} ⁻¹		96485,338							
Werte flächenbezogen									
	A _{ges}	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	ΣQ1, Q2, Q3	
	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	
Probe 1	0,1479487	0,0009644	0,0029949	0,1438462	0,0009644	0,0039654	0,0171795	0,14780538	
Probe 2	0,1644872	0,0022769	0,0124295	0,1494872	0,0022769	0,0147179	0,0320769	0,16419359	
Probe 3	0,1864103	0,0020962	0,0124256	0,1717949	0,0020962	0,0145385	0,0333846	0,18631667	
Probe 4	0,1970513	0,0035397	0,0163333	0,1769231	0,0035397	0,0198974	0,0385256	0,19679615	
Probe 5	0,1534615	0,0011923	0,0046192	0,1474359	0,0011923	0,0058167	0,018141	0,15324744	
X	0,1698718	0,0020139	0,0097605	0,1578974	0,0020139	0,0117872	0,0278615	0,16967185	
S	0,021161	0,0010223	0,0056929	0,0152703	0,0010223	0,0066851	0,0096254	0,02115829	
Elimination der nicht berücksichtigten Proben									
	A _{ges}	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	ΣQ1, Q2, Q3	
	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	
Probe 1	0,1479487	0,0009644	0,0029949	0,1438462	0,0009644	0,0039654	0,0171795	0,14780538	
Probe 2	0,1644872	0,0022769	0,0124295	0,1494872	0,0022769	0,0147179	0,0320769	0,16419359	
Probe 3	0,1864103	0,0020962	0,0124256	0,1717949	0,0020962	0,0145385	0,0333846	0,18631667	
Probe 4	0,1970513	0,0035397	0,0163333	0,1769231	0,0035397	0,0198974	0,0385256	0,19679615	
Probe 5	0,1534615	0,0011923	0,0046192	0,1474359	0,0011923	0,0058167	0,018141	0,15324744	
X	0,1698718	0,0020139	0,0097605	0,1578974	0,0020139	0,0117872	0,0278615	0,16967185	
S	0,021161	0,0010223	0,0056929	0,0152703	0,0010223	0,0066851	0,0096254	0,02115829	
Berechneter Massenverlust									
	Δm A _{ges}	Δm Q1	Δm Q2	Δm Q3	Δm Q4	Δm Q5	Δm Q6	Δm ΣQ1,Q2,Q3	
	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	
Co	51,879	0,615	2,981	48,222	0,615	3,600	8,509	51,818	
Cr	30,515	0,362	1,753	28,364	0,362	2,117	5,005	30,479	
W	53,948	0,640	3,100	50,145	0,640	3,743	8,848	53,884	
Mo	28,152	0,334	1,618	26,167	0,334	1,953	4,617	28,119	
Mn	48,364	0,573	2,779	44,954	0,573	3,356	7,932	48,307	
Si	12,364	0,147	0,710	11,492	0,147	0,858	2,028	12,349	
Nb	32,714	0,388	1,880	30,408	0,388	2,270	5,366	32,675	
Massenverlust auf Legierungsanteil reduziert									
	Legierungs-Anteil	Δm Anteil	Δm Q1 Anteil	Δm Q2 Anteil	Δm Q3 Anteil	Δm Q4 Anteil	Δm Q5 Anteil	Δm Q6 Anteil	Δm ΣQ1,Q2,Q3 Anteil
	%	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]
Co	65	33,721	0,400	1,938	31,344	0,400	2,340	5,531	33,681
Cr	28	8,544	0,101	0,491	7,942	0,101	0,593	1,401	8,534
W	6	3,237	0,038	0,186	3,009	0,038	0,225	0,531	3,233
Mo	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	0,5	0,242	0,003	0,014	0,225	0,003	0,017	0,040	0,242
Si	0,5	0,062	0,001	0,004	0,057	0,001	0,004	0,010	0,062
Nb	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Massenverlust-Vergleich									
	Legierungs-Anteil	analytisch*	analytisch zu berechnet	analytisch	analytisch /				
	%	[μg/cm ²]	Δm A _{ges}	Δm Anteil	/Δm A _{ges}	/Δm Anteil	/Δm Anteil	/Δm Anteil	/Δm Anteil
Co	65	26,282	51,879	33,721	0,51	0,51	0,51	0,51	0,78
Cr	28	7,051	30,515	8,544	0,23	0,23	0,23	0,23	0,83
W	6	29,487	53,948	3,237	0,55	0,55	0,55	0,55	9,11
Mo	0		28,152	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!
Mn	0,5		48,364	0,242	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Si	0,5		12,364	0,062	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nb	0		32,714	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!

* aus Analyse ICP-OES

Tabelle 29: Massenverluste der Elemente der Legierung Co-3 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Berechnung Massenverlust									
Co-3 in 0,1 M NaCl-Milchsäure									
Verwendete Konstanten:									
		Co	Cr	W	Mo	Mn	Si	Nb	
Molmasse:	g [*] mol ⁻¹	58,933	51,996	183,85	95,94	54,94	28,09	92,906	
Wertigkeit		2	3	6	6	2	4	5	
Oxidationszahlen		-1;0;2;3	0;2;3;6	0,2,3;4;5;6	0;2;3;4;5;6	1;0;2;3;4;6;7	-4;4	3;4	
	Faraday-Konstante C [*] mol ⁻¹	96485,338							
Werte flächenbezogen									
	A _{ges}	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	ΣQ1, Q2, Q3	
	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]
Probe 1	0,3301282	0,0190897	0,0606154	0,2497436	0,0190897	0,079859	0,1239103	0,32944872	
Probe 2	0,2610256	0,0233462	0,0866923	0,2516667	0,0233462	0,1102179	0,1579487	0,36170513	
Probe 3	0,2880769	0,0071718	0,0451667	0,2355128	0,0071718	0,0524103	0,0911538	0,28785128	
Probe 4	0,2535897	0,0080987	0,0363205	0,2088462	0,0042526	0,0444872	0,0765641	0,25326538	
Probe 5	0,2662821	0,0146282	0,0485256	0,2026923	0,0146282	0,0632564	0,0987949	0,26584615	
X	0,2798205	0,0144669	0,0554641	0,2296923	0,0136977	0,0700462	0,1096744	0,29962333	
S	0,0309177	0,0069644	0,0195089	0,0228165	0,0079817	0,026079	0,0319794	0,04520022	
Elimination der nicht berücksichtigten Proben									
	A _{ges}	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	ΣQ1, Q2, Q3	
	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]
Probe 1	0,3301282	0,0190897	0,0606154	0,2497436	0,0190897	0,079859	0,1239103	0,32944872	
Probe 2									
Probe 3									
Probe 4	0,2535897	0,0080987	0,0363205	0,2088462	0,0042526	0,0444872	0,0765641	0,25326538	
Probe 5	0,2662821	0,0146282	0,0485256	0,2026923	0,0146282	0,0632564	0,0987949	0,26584615	
X	0,2833333	0,0139389	0,0484872	0,2204274	0,0126568	0,0625342	0,0997564	0,28285342	
S	0,0410194	0,0055278	0,0121475	0,0255744	0,0076125	0,017697	0,0236877	0,04084006	
Berechneter Massenverlust									
	Δm A _{ges}	Δm Q1	Δm Q2	Δm Q3	Δm Q4	Δm Q5	Δm Q6	Δm	ΣQ1,Q2,Q3
	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]
Co	86,530	4,257	14,808	67,318	3,865	19,098	30,465	86,383	
Cr	50,896	2,504	8,710	39,596	2,274	11,233	17,920	50,810	
W	89,981	4,427	15,398	70,003	4,020	19,860	31,680	89,828	
Mo	46,955	2,310	8,036	36,530	2,098	10,363	16,532	46,876	
Mn	80,667	3,968	13,805	62,757	3,603	17,804	28,401	80,530	
Si	20,622	1,015	3,529	16,043	0,921	4,551	7,261	20,587	
Nb	54,564	2,684	9,338	42,450	2,437	12,043	19,211	54,472	
Massenverlust auf Legierungsanteil reduziert									
	Legierungs-Anteil	Δm Anteil	Δm Q1 Anteil	Δm Q2 Anteil	Δm Q3 Anteil	Δm Q4 Anteil	Δm Q5 Anteil	Δm Q6 Anteil	Δm ΣQ1,Q2,Q3 Anteil
	%	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]
Co	71	61,436	3,022	10,514	47,796	2,744	13,559	21,630	61,332
Cr	20	10,179	0,501	1,742	7,919	0,455	2,247	3,584	10,162
W	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mo	7	3,287	0,162	0,562	2,557	0,147	0,725	1,157	3,281
Mn	0,5	0,403	0,020	0,069	0,314	0,018	0,089	0,142	0,403
Si	0,5	0,103	0,005	0,018	0,080	0,005	0,023	0,036	0,103
Nb	1	0,546	0,027	0,093	0,425	0,024	0,120	0,192	0,545
Massenverlust-Vergleich									
	Legierungs-Anteil	analytisch*	analytisch*	Δm A _{ges}	Δm Anteil A _{ges}	analytisch / Δm A _{ges}	analytisch / Δm Anteil		
	%	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]				
Co	71	59,006	86,530	61,436	61,436	0,68	0,96		
Cr	20	10,192	50,896	10,179	10,179	0,20	1,00		
W	0	0,000	89,981	0,000	0,000	0,00	#DIV/0!		
Mo	7	0,000	46,955	3,287	3,287	0,00	0,00		
Mn	0,5		80,667	0,403	0,403	0,00	0,00		
Si	0,5		20,622	0,103	0,103	0,00	0,00		
Nb	1		54,564	0,546	0,546	0,00	0,00		

* aus Analyse ICP-OES

Tabelle 30: Massenverluste der Elemente der Legierung Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure

Berechnung Massenverlust									
Co-4 in 0,1 M NaCl-Milchsäure									
Verwendete Konstanten:									
		Co	Cr	W	Mo	Mn	Si	Nb	
Molmasse:	g* ^{mol} ⁻¹	58,933	51,996	183,85	95,94	54,94	28,09	92,906	
Wertigkeit		2	3	6	6	2	4	5	
Oxidationszahlen		-1;0;2;3	0;2;3;6	0,2;3;4;5;6	0;2;3;4;5;6	1;0;2;3;4;6;7	-4;4	3;4	
	Faraday-Konstante C* ^{mol} ⁻¹	96485,338							
Werte flächenbezogen									
	A _{ges}	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	ΣQ1, Q2, Q3	
	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]
Probe 1	0,2541026	0,0102987	0,0325256	0,2058974	0,0102987	0,042859	0,0785641	0,24872179	
Probe 2	0,2753846	0,0169615	0,0530897	0,1985897	0,0169615	0,0701154	0,1145641	0,26864103	
Probe 3	0,2358974	0,0166282	0,0394231	0,1738462	0,0166282	0,0561282	0,0911795	0,22989744	
Probe 4	0,2569231	0,0207179	0,0532436	0,1755128	0,0207179	0,0740385	0,1168846	0,24947436	
Probe 5	0,2055128	0,0044436	0,0158462	0,1842308	0,0044436	0,0203077	0,046	0,20452051	
X	0,2455641	0,01381	0,0388256	0,1876154	0,01381	0,0526897	0,0894385	0,24025103	
S	0,0264043	0,0064353	0,015648	0,0141615	0,0064353	0,0218888	0,0291238	0,02422128	
Elimination der nicht berücksichtigten Proben									
	A _{ges}	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	ΣQ1, Q2, Q3	
	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]	[C/cm ²]
Probe 1	0,2541026	0,0102987	0,0325256	0,2058974	0,0102987	0,042859	0,0785641	0,24872179	
Probe 2	0,2753846	0,0169615	0,0530897	0,1985897	0,0169615	0,0701154	0,1145641	0,26864103	
Probe 3	0,2358974	0,0166282	0,0394231	0,1738462	0,0166282	0,0561282	0,0911795	0,22989744	
Probe 4	0,2569231	0,0207179	0,0532436	0,1755128	0,0207179	0,0740385	0,1168846	0,24947436	
Probe 5	0,2055128	0,0044436	0,0158462	0,1842308	0,0044436	0,0203077	0,046	0,20452051	
X	0,2555769	0,0161516	0,0445705	0,1884615	0,0161516	0,0607853	0,1002981	0,24918365	
S	0,0161618	0,0043201	0,0103179	0,0162057	0,0043201	0,0142096	0,0185665	0,0158203	
Berechneter Massenverlust									
	Δm A _{ges}	Δm Q1	Δm Q2	Δm Q3	Δm Q4	Δm Q5	Δm Q6	Δm	ΣQ1,Q2,Q3
	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]
Co	78,053	4,933	13,612	57,556	4,933	18,564	30,631	76,100	
Cr	45,910	2,901	8,006	33,854	2,901	10,919	18,017	44,762	
W	81,166	5,129	14,155	59,851	5,129	19,304	31,853	79,135	
Mo	42,355	2,677	7,386	31,233	2,677	10,074	16,622	41,296	
Mn	72,764	4,598	12,690	53,656	4,598	17,306	28,556	70,944	
Si	18,602	1,176	3,244	13,717	1,176	4,424	7,300	18,136	
Nb	49,219	3,110	8,583	36,294	3,110	11,706	19,315	47,988	
Massenverlust auf Legierungsanteil reduziert									
	Legierungs-Anteil	Δm Anteil	Δm Q1 Anteil	Δm Q2 Anteil	Δm Q3 Anteil	Δm Q4 Anteil	Δm Q5 Anteil	Δm Q6 Anteil	Δm ΣQ1,Q2,Q3 Anteil
	%	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]
Co	64	49,954	3,157	8,712	36,836	3,157	11,881	19,604	48,704
Cr	20	9,182	0,580	1,601	6,771	0,580	2,184	3,603	8,952
W	14	11,363	0,718	1,982	8,379	0,718	2,703	4,459	11,079
Mo	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	0,5	0,364	0,023	0,063	0,268	0,023	0,087	0,143	0,355
Si	0,5	0,093	0,006	0,016	0,069	0,006	0,022	0,037	0,091
Nb	1	0,492	0,031	0,086	0,363	0,031	0,117	0,193	0,480
Massenverlust-Vergleich									
	Legierungs-Anteil	analytisch*	analytisch / Δm A _{ges}	analytisch / Δm Anteil					
	%	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]	[μg/cm ²]
Co	64	50,449	78,053	49,954	0,65	1,01			
Cr	20	7,252	45,910	9,182	0,16	0,79			
W	14	9,071	81,166	11,363	0,11	0,80			
Mo	0		42,355	0,000	0,00	#DIV/0!			
Mn	0,5		72,764	0,364	0,00	0,00			
Si	0,5		18,602	0,093	0,00	0,00			
Nb	1		49,219	0,492	0,00	0,00			

* aus Analyse ICP-OES

t-Test Auswertung

Tabelle 31: Zusammenstellung der t-Test-Ergebnisse aus der statistischen Auswertung in 0,9 % NaCl auf Gesamtfläche bezogen

Leg.	Vergleich	Stichprobe	Anzahl	Mittelwert	Standard- abweichung	Levene - Test	T-Test für die Mittelwertgleichheit bei gleicher Varianz		
						Signifikanz	T-Wert	df	Sig. (2-seitig)
Co-1	Ages. Anteil	analytisch	5	249,774	31,494	0,409	-8,510	7,000	0,000
		berechnet	4	483,255	50,802				
	Q1,2,3	analytisch	5	249,774	31,494	0,409	-8,481	7,000	0,000
		berechnet	4	482,3075	50,75223				
	Q6	analytisch	5	249,774	31,494	0,310	-4,485	7,000	0,003
berechnet		4	379,576	54,967					
Co-2	Ages. Anteil	analytisch	5	41,442	6,41847	0,457	-12,980	6,000	0,000
		berechnet	3	95,6917	3,9829				
	Q1,2,3	analytisch	5	41,442	6,41847	0,458	-12,956	6,000	0,000
		berechnet	3	95,621	3,99727				
	Q6	analytisch	5	41,442	6,4187	0,979	1,335	6,000	0,230
berechnet		3	35,211	6,33942					
Co-3	Ages. Anteil	analytisch	4	93,3475	13,132	0,937	-6,680	6,000	0,001
		berechnet	4	155,0487	12,99318				
	Q1,2,3	analytisch	4	93,3475	13,13203	0,868	-6,672	6,000	0,001
		berechnet	4	154,0855	12,61242				
	Q6	analytisch	4	93,3475	13,13203	0,496	2,311	6,000	0,060
berechnet		4	74,4413	9,76461					
Co-4	Ages. Anteil	analytisch	4	59,9775	25,72785	0,195	-2,061	7,000	0,078
		berechnet	5	86,7882	12,71768				
	Q1,2,3	analytisch	4	59,9775	25,72785	0,194	-2,052	7,000	0,079
		berechnet	5	86,6534	12,68852				
	Q6	analytisch	4	59,9775	25,72785	0,204	0,872	7,000	0,412
berechnet		5	48,6086	12,83921					

Tabelle 32: Zusammenstellung der t-Test-Ergebnisse aus der statistischen Auswertung in 0,9 % NaCl auf Legierungsanteil reduziert

Leg.	Vergleich	Stichprobe	Anzahl	Mittelwert	Standard- abweichung	Levene - Test	T-Test für die Mittelwertgleichheit bei gleicher Varianz		
						Signifikanz	T-Wert	df	Sig. (2-seitig)
Co-1	Ages. Anteil	analytisch	5	249,774	31,494	0,772	-4,149	7	0,004
		berechnet	4	343,111	36,069				
	Q1,2,3	analytisch	5	249,774	31,494	0,772	-4,122	7	0,004
		berechnet	4	342,439	36,034				
	Q6	analytisch	5	249,774	31,494	0,636	-0,842	7	0,428
berechnet		4	269,499	39,026					
Co-2	Ages. Anteil	analytisch	5	41,442	6,418	0,254	-5,216	6	0,002
		berechnet	3	62,200	2,589				
	Q1,2,3	analytisch	5	41,442	6,419	0,255	-5,203	6	0,002
		berechnet	3	62,154	2,598				
	Q6	analytisch	5	41,442	6,418	0,514	4,414	6	0,004
berechnet		3	22,887	4,121					
Co-3	Ages. Anteil	analytisch	4	93,348	13,132	0,434	-2,086	6	0,082
		berechnet	4	110,085	9,225				
	Q1,2,3	analytisch	4	93,348	13,132	0,397	-2,02	6	0,09
		berechnet	4	109,401	8,955				
	Q6	analytisch	4	93,348	13,132	0,208	5,454	6	0,002
berechnet		4	52,853	6,933					
Co-4	Ages. Anteil	analytisch	4	59,978	25,728	0,075	0,369	7	0,723
		berechnet	5	55,544	8,139				
	Q1,2,3	analytisch	4	59,978	25,728	0,075	0,376	7	0,718
		berechnet	5	55,458	8,121				
	Q6	analytisch	4	59,978	25,728	0,077	2,397	7	0,048
berechnet		5	31,110	8,217					

Tabelle 33: Zusammenstellung der t-Test-Ergebnisse aus der statistischen Auswertung in 0,1 M NaCl-Milchsäure auf Gesamtfläche bezogen

Leg.	Vergleich	Stichprobe	Anzahl	Mittelwert	Standard- abweichung	Levene - Test	T-Test für die Mittelwertgleichheit bei gleicher Varianz		
						Signifikanz	T-Wert	df	Sig. (2-seitig)
Co-1	Ages. Anteil	analytisch	5	261,986	64,58	0,654	-2,702	8	0,027
		berechnet	5	382,304	75,774				
	Q1,2,3	analytisch	5	261,986	64,58	0,65	-2,682	8	0,028
		berechnet	5	381,61	75,982				
	Q6	analytisch	5	261,986	64,58	0,721	-0,914	8	0,387
		berechnet	5	301,382	71,489				
Co-2	Ages. Anteil	analytisch	4	26,285	2,96181	0,062	-7,259	7	0
		berechnet	5	51,8784	6,46249				
	Q1,2,3	analytisch	4	26,285	2,96181	0,06	-7,243	7	0
		berechnet	5	51,8178	6,46142				
	Q6	analytisch	4	26,285	2,96181	0,883	8,985	7	0
		berechnet	5	8,509	2,93964				
Co-3	Ages. Anteil	analytisch	5	59,008	7,98113	0,312	-3,871	6	0,008
		berechnet	3	86,5297	12,52747				
	Q1,2,3	analytisch	5	59,008	7,98113	0,316	-3,86	6	0,008
		berechnet	3	86,383	12,47237				
	Q6	analytisch	5	59,008	7,98113	0,797	5,049	6	0,002
		berechnet	3	30,4657	7,23397				
Co-4	Ages. Anteil	analytisch	5	50,45	7,75658	0,162	-6,146	7	0
		berechnet	4	78,053	4,93565				
	Q1,2,3	analytisch	5	50,45	7,75658	0,145	-5,739	7	0,001
		berechnet	4	76,1002	4,83181				
	Q6	analytisch	5	50,45	7,75658	0,327	4,257	7	0,004
		berechnet	4	30,6308	5,6703				

Tabelle 34: Zusammenstellung der t-Test-Ergebnisse aus der statistischen Auswertung in 0,1 M NaCl-Milchsäure auf Legierungsanteil reduziert

Leg.	Vergleich	Stichprobe	Anzahl	Mittelwert	Standard- abweichung	Levene - Test	T-Test für die Mittelwertgleichheit bei gleicher Varianz		
						Signifikanz	T-Wert	df	Sig. (2-seitig)
Co-1	Ages. Anteil	analytisch	5	261,986	64,580	0,631	-0,251	8,000	0,808
		berechnet	5	271,436	53,800				
	Q1,2,3	analytisch	5	261,986	64,580	0,635	-0,238	8,000	0,818
		berechnet	5	270,943	53,948				
	Q6	analytisch	5	261,986	64,580	0,544	1,307	8,000	0,228
		berechnet	5	213,981	50,757				
Co-2	Ages. Anteil	analytisch	4	26,285	2,962	0,303	-2,979	7,000	0,021
		berechnet	5	33,721	4,200				
	Q1,2,3	analytisch	4	26,285	2,962	0,297	-2,964	7,000	0,021
		berechnet	5	33,682	4,200				
	Q6	analytisch	4	26,285	2,962	0,018	12,796	7,000	0,000
		berechnet	5	5,531	1,911				
Co-3	Ages. Anteil	analytisch	5	59,008	7,981	0,765	-0,401	6,000	0,702
		berechnet	3	61,436	8,894				
	Q1,2,3	analytisch	5	59,008	7,981	0,771	-0,384	6,000	0,714
		berechnet	3	61,332	8,855				
	Q6	analytisch	5	59,008	7,981	0,476	7,149	6,000	0,000
		berechnet	3	21,631	5,136				
Co-4	Ages. Anteil	analytisch	5	50,450	7,757	0,040	0,119	7,000	0,909
		berechnet	4	49,954	3,159				
	Q1,2,3	analytisch	5	50,450	7,757	0,037	0,420	7,000	0,687
		berechnet	4	48,704	3,092				
	Q6	analytisch	5	50,450	7,757	0,062	7,268	7,000	0,000
		berechnet	4	19,604	3,629				

Analytische Auswertung der Elektrolytlösung des statischen Immersionstest

Tabelle 35: Messergebnisse und Standardabweichungen der Legierung Co-1 im statischen Immersionstest

Legierung Co-1		Elektrolyt: 0,1 M NaCl-Milchsäure										
Mittelwert von Massenverlust in µg/cm²		Element										
Legierung	Tag	Probe	Mo	Co	Cr	Mn	Nb	Si	W	Gesamtergebnis		
Co-1	1	1	0	1,08345534	0,33674963	0	0	0,08784773	0	0,215436101		
		2	0	0,91836735	0,27696793	0	0	0,05830904	0	0,179092045		
		3	0	0,70162482	0,19202363	0	0	0	0	0,127664064		
		4	0	0,79447323	0,26770294	0	0	0	0	0,151739452		
		5	0	0,80152672	0,19083969	0,07633588	0	0,02290076	0	0,155943293		
		1 Ergebnis Mw		0	0,859889491	0,252856766	0,015267176	0	0,033811506	0	0,165974991	
		1 Stabw.(s)		0	0,146743448	0,062021281	0,034138442	0	0,038488709	0	0,033126542	
		4	1	0	0,70278184	0,16105417	0	0	0	0	0,123405145	
	2		0	0,72157434	0,25510204	0	0	0	0	0,139525198		
	3		0	0,69423929	0,21418021	0	0	0	0	0,129774214		
4	0		0,69084629	0,25043178	0	0	0	0	0,134468295			
5	0		0,59541985	0,20610687	0	0	0	0	0,114503817			
	4 Ergebnis Mw		0	0,680972323	0,217375014	0	0	0	0	0,128335334		
	4 Stabw.(s)		0	0,049287202	0,038161804	0	0	0	0	0,009753387		
	7	1	0	0,92972182	0,33674963	0	0	0	0	0,180924493		
2		0	0,39358601	0,13119534	0	0	0	0	0,074968763			
3		0	1,16691285	0,40620384	0	0	0	0	0,224730956			
4		0	0,43177893	0,15544041	0	0	0	0	0,083888478			
5		0	0,76335878	0,29007634	0	0	0	0	0,150490731			
	7 Ergebnis Mw		0	0,737071676	0,263933112	0	0	0	0	0,143000684		
	7 Stabw. (s)		0	0,329300239	0,11791592	0	0	0	0	0,06382936		
	14	1	0	0,67349927	0,25622255	0	0	0	0	0,132817402		
2		0	0,34985423	0,11661808	0	0	0	0	0,0666389			
3		0	3,49335303	1,22599705	0	0	0,0295421	0,03692762	0,683688542			
4		0	1,24352332	0,44905009	0	0	0	0	0,2417962			
5		0	0,57251908	0,19083969	0	0	0	0	0,109051254			
	14 Ergebnis Mw		0	1,266549785	0,44774549	0	0	0,005908419	0,007385524	0,24679846		
	14 Stabw. (s)		0	1,287720969	0,452217916	0	0	0,013211628	0,016514535	0,252646694		
	21	1	0	2,07174231	0,73938507	0	0	0,25622255	0,02196193	0,441330266		
2		0	0,18221574	0,05102041	0	0	0,0728863	0	0,043731778			
3		0	0,31019202	0,11816839	0	0	0,07385524	0	0,071745094			
4		0	0,17271157	0	0	0	0,02590674	0	0,028374044			
5		0	0,30534351	0,09160305	0	0	0,03816794	0	0,062159215			
	21 Ergebnis Mw		0	0,608441033	0,200035383	0	0	0,093407753	0,004392387	0,129468079		
	21 Stabw. (s)		0	0,820609435	0,304785774	0	0	0,093434352	0,009821675	0,175136494		
	28	1	0	0,08784773	0	0	0	0	0	0,012549676		
2		0	0,10204082	0	0	0	0	0	0,014577259			
3		0	0,13293944	0,04431315	0	0	0	0	0,025321798			
4		0	1,88255613	0,67357513	0	0	0,16407599	0	0,388601036			
5		0	0,24427481	0,07633588	0	0	0	0	0,045801527			
	28 Ergebnis Mw		0	0,489931785	0,158844831	0	0	0,032815199	0	0,097370259		
	28 Stabw. (s)		0	0,78091684	0,289540962	0	0	0,073377015	0	0,163336227		
	35	1	0	0,14641288	0,04392387	0	0	0	0	0,027190964		
2		0	0,08746356	0	0	0	0	0	0,012494794			
3		0	0,16248154	0,05908419	0	0	0	0	0,031652247			
4		0	0,44041451	0,15544041	0	0	0,04317789	0	0,091290402			
5		0	0,07633588	0	0	0	0	0	0,010905125			
	35 Ergebnis Mw		0	0,182621673	0,051689695	0	0	0,008635579	0	0,034706707		
	35 Stabw. (s)		0	0,148766247	0,063684472	0	0	0,019309741	0	0,032891545		
	42	1	0	0	0	0	0	0	0	0		
2		0	0,48104956	0,16034985	0	0	0,04373178	0	0,097875885			
3		0	0,31019202	0,10339734	0	0	0,0295421	0	0,063304495			
4		0	1,70120898	0,6044905	0	0	0,15544041	0	0,351591414			
5		0	0,0610687	0	0	0	0	0	0,0087241			
	42 Ergebnis Mw.		0	0,510703854	0,173647539	0	0	0,045742858	0	0,104299179		
	42 Stabw. (s)		0	0,693068724	0,250521712	0	0	0,064196731	0	0,143951543		
	Co-1 Erg 1-42 Ergebnis Mw		0	0,6670227	0,22076598	0,0019084	0	0,02754016	0,00147224	0,131244212		
	1-42 Stabw. (s)		0	0,31523341	0,11307099	0,00539776	0	0,03180133	0,002841	0,060829752		
Zusammenstellung Ergebnis:												
Massenverlust in µg/cm² nach:												
		1. Tag	0	0,85988949	0,25285677	0,01526718	0	0,03381151	0	0,165974991		
		2.-4. Tag	0	0,68097232	0,21737501	0	0	0	0	0,128335334		
		3.-7. Tag	0	0,73707168	0,26393311	0	0	0	0	0,143000684		
		8.-14. Tag	0	1,26654978	0,44774549	0	0	0,00590842	0,00738552	0,24679846		
		15.-21. Tag	0	0,60844103	0,20003538	0	0	0,09340775	0,00439239	0,129468079		
		22.-28. Tag	0	0,48993179	0,15884483	0	0	0,0328152	0	0,097370259		
		29.-35. Tag	0	0,18262167	0,05168969	0	0	0,00863558	0	0,034706707		
		36.-42. Tag	0	0,51070385	0,17364754	0	0	0,04574286	0	0,104299179		
		Massenverlust gesamt:	0	5,33618162	1,76612783	0,01526718	0	0,22032131	0,01177791	1,049953693		
Massenverlust in µg/cm² kumulierend												
		nach 1 Tag	0	0,85988949	0,25285677	0,01526718	0	0,03381151	0	0,165974991		
		nach 4 Tagen	0	1,54086181	0,47023178	0,01526718	0	0,03381151	0	0,294310325		
		nach 7 Tagen	0	2,27793349	0,73416489	0,01526718	0	0,03381151	0	0,437311009		
		nach 14 Tagen	0	3,54448327	1,18191038	0,01526718	0	0,03971993	0,00738552	0,684109469		
		nach 21 Tagen	0	4,15292431	1,38194577	0,01526718	0	0,13312768	0,01177791	0,813577548		
		nach 28 Tagen	0	4,64285609	1,5407906	0,01526718	0	0,16594288	0,01177791	0,910947807		
		nach 35 Tagen	0	4,82547776	1,59248029	0,01526718	0	0,17457846	0,01177791	0,945654514		
		nach 42 Tagen	0	5,33618162	1,76612783	0,01526718	0	0,22032131	0,01177791	1,049953693		

Tabelle 36: Messergebnisse und Standardabweichungen der Legierung Co-2 im statischen Immersionstest

Legierung Co-2			Elektrolyt: 0,1 M NaCl-Milchsäure								
Mittelwert von Massenverlust in µg/cm²			Element								
Legierung	Tag	Probe	Mo	Co	Cr	Mn	Nb	Si	W	Gesamtergebnis	
Co-2	1	1	0	0,44985251	0,13274336		0	0	0	0	0,083227981
		2	0	0,55228277	0,18409426		0	0	0	0,05891016	0,113612455
		3	0	0,25	0,05882353		0	0	0	0	0,044117647
		4	0	0,70692194	0,2724595		0	0	0	0,06627393	0,149379339
		5	0	0,95555556	0,3037037	0,04444444		0	0	0,0962963	0,2
		1 Ergebnis Mw.		0	0,582922555	0,19036487	0,00888889		0	0,044296078	0,118067485
		1 Stabw. (s)		0	0,26632455	0,100309399	0,01987616		0	0,04279283	0,059990804
	4	1	0	0,56047198	0,18436578		0	0	0	0	0,106405394
		2	0	0,43446244	0,16200295		0	0	0	0	0,085209341
		3	0	0,08823529	0		0	0	0	0	0,012605042
		4	0	1,26656848	0,52282769		0	0	0	0,12518409	0,273511466
		5	0	1,00740741	0,38518519		0	0	0	0,08888889	0,211640212
		4 Ergebnis Mw.		0	0,671429121	0,25087632		0	0	0,042814597	0,137874291
		4 Stabw. (s)		0	0,467881396	0,204485619		0	0	0,060014256	0,104037406
	7	1	0	0,92182891	0,3539823		0	0	0	0,07374631	0,192793932
		2	0	0,05891016	0		0	0	0	0	0,008415737
		3	0	0	0		0	0	0	0	0
		4	0	0,91310751	0,38291605		0	0	0	0,08836524	0,19776983
		5	0	0,68888889	0,28148148		0	0	0	0,05925926	0,147089947
		7 Ergebnis Mw.		0	0,516547094	0,203675967		0	0	0,044274163	0,109213889
		7 Stabw. (s)		0	0,45482625	0,189565622		0	0	0,041706076	0,097916182
	14	1	0	1,84365782	0,79646018		0	0	0	0,18436578	0,403497682
		2	0	0,0736377	0		0	0	0	0	0,010519672
		3	0	0,05882353	0		0	0	0	0	0,008403361
		4	0	1,01620029	0,41237113		0	0	0	0,09572901	0,217757206
		5	0	0,78518519	0,31851852		0	0	0	0,07407407	0,168253968
		14 Ergebnis Mw.		0	0,75550096	0,305469966		0	0	0,070833774	0,161686378
		14 Stabw. (s)		0	0,742163659	0,331396029		0	0	0,076737599	0,164321966
	21	1	0	0,7300885	0,28761062		0	0	0,06637168	0,05899705	0,163295407
		2	0	0	0		0	0	0	0	0
		3	0	0	0		0	0	0	0	0
		4	0	0,83210604	0,32400589		0	0	0,0736377	0,0736377	0,186198191
		5	0	0,51851852	0,19259259		0	0	0,04444444	0,02222222	0,111111111
		21 Ergebnis Mw.		0	0,41614261	0,160841821		0	0,036890766	0,030971395	0,092120942
		21 Stabw. (s)		0	0,396364026	0,154467744		0	0,0353496	0,033914797	0,088387634
	28	1	0	0,61946903	0,22861357		0	0	0,05162242	0,05899705	0,136957438
		2	0	0	0		0	0	0	0	0
		3	0	0	0		0	0	0	0	0
		4	0	0,38291605	0,14727541		0	0	0,03681885	0	0,081001473
		5	0	0,63703704	0,24444444		0	0	0,05925926	0,05925926	0,142857143
		28 Ergebnis Mw.		0	0,327884423	0,124066684		0	0,029540106	0,023651262	0,072163211
		28 Stabw. (s)		0	0,31569043	0,11910561		0	0,028147258	0,032385957	0,070158921
35	1	0	0,56047198	0,21386431		0	0	0,05162242	0,05162242	0,125368732	
	2	0	0	0		0	0	0	0	0	
	3	0	0	0		0	0	0	0	0	
	4	0	0,26509573	0,09572901		0	0	0,02209131	0	0,054702293	
	5	0	0,34074074	0,13333333		0	0	0,02962963	0	0,071957672	
	35 Ergebnis Mw.		0	0,233261689	0,088585331		0	0,020668672	0,010324484	0,050405739	
	35 Stabw. (s)		0	0,238984181	0,091437081		0	0,021764909	0,023086248	0,052876917	
42	1	0	0,54572271	0,19911504		0	0	0,05162242	0,02212389	0,116940582	
	2	0	0	0		0	0	0	0	0	
	3	0	0	0		0	0	0	0	0	
	4	0	0	0		0	0	0	0	0	
	5	0	0,14814815	0,04444444		0	0	0	0	0,027513228	
	42 Ergebnis Mw.		0	0,138774172	0,048711898		0	0,010324484	0,004424779	0,028890762	
	42 Stabw. (s)		0	0,236362962	0,08625234		0	0,023086248	0,009894106	0,050642612	
Co-2 Erg.	1-42 Ergebnis Mw.		0	0,45530782	0,17157411	0,00111111		0	0,012178	0,03394882	0,096302837
	1-42 Stabw. (s)		0	0,21518389	0,08447735	0,0031427		0	0,01502809	0,02137242	0,044552905
Zusammenstellung Ergebnis:											
Massenverlust in µg/cm² nach:											
		1. Tag	0	0,58292256	0,19036487	0,00888889		0	0,04429608	0,118067485	
		2.-4. Tag	0	0,67142912	0,25087632	0		0	0,0428146	0,137874291	
		3.-7. Tag	0	0,51654709	0,20367597	0		0	0,04427416	0,109213889	
		8.-14. Tag	0	0,75550091	0,30546997	0		0	0,07083377	0,161686378	
		15.-21. Tag	0	0,41614261	0,16084182	0		0,03689077	0,03097139	0,092120942	
		22.-28. Tag	0	0,32788442	0,12406668	0		0,02954011	0,02365126	0,072163211	
		29.-35. Tag	0	0,23326169	0,08858533	0		0,02066867	0,01032448	0,050405739	
		36.-42. Tag	0	0,13877417	0,0487119	0		0,01032448	0,00442478	0,028890762	
		Massenverlust gesamt:	0	3,64246257	1,37259286	0,00888889		0	0,09742403	0,27159053	0,770422696
Massenverlust in µg/cm² kumulierend											
		nach 1 Tag	0	0,58292256	0,19036487	0,00888889		0	0,04429608	0,118067485	
		nach 4 Tagen	0	1,25435168	0,44124119	0,00888889		0	0,08711067	0,255941776	
		nach 7 Tagen	0	1,77089877	0,64491716	0,00888889		0	0,13138484	0,365155665	
		nach 14 Tagen	0	2,52639968	0,95038712	0,00888889		0	0,20221861	0,526842043	
		nach 21 Tagen	0	2,94254229	1,11122894	0,00888889		0,03689077	0,23319001	0,618962985	
		nach 28 Tagen	0	3,27042671	1,23529563	0,00888889		0,06643087	0,25684127	0,691126195	
		nach 35 Tagen	0	3,5036884	1,32388096	0,00888889		0,08709954	0,26716575	0,741531935	
		nach 42 Tagen	0	3,64246257	1,37259286	0,00888889		0,09742403	0,27159053	0,770422696	

Tabelle 37: Messergebnisse und Standardabweichungen der Legierung Co-3 im statischen Immersionstest

Legierung Co-3			Elektrolyt: 0,1 M NaCl-Milchsäure									
Mittelwert von Massenverlust in µg/cm²			Element									
Legierung	Tag	Probe	Mo	Co	Cr	Mn	Nb	Si	W	Gesamtergebnis		
Co-3	1	1	1	0,35294118	2,67647059	0,13235294	0	0	0,02941176	0,455882353		
			2	0,21021021	1,7042042	0,09009009	0	0	0	0,286357786		
			3	0,43731778	3,41836735	0,16763848	0	0,02186589	0,03644315	0,583090379		
			4	0,25974026	2,13564214	0,11544012	0,1010101	0	0,06493506	0,02164502	0,385487528	
			5	0,33136966	2,59204713	0,13254786	0	0	0	0,02945508	0,440774248	
		1 Ergebnis Mw.		0,318315818	2,505346281	0,127613899	0,02020202	0	0,017360191	0,023391003	0,430318459	
		1 Stabw. (s)		0,087533857	0,642050974	0,028306391	0,04517309	0	0,028230297	0,014085175	0,108208807	
		4	1	1	0,50735294	3,38235294	0,18382353	0	0	0,03676471	0,587184874	
	2			0,1951952	1,42642643	0,09009009	0	0	0	0,244530245		
	3			0,4154519	2,80612245	0,17492711	0	0	0	0,02915452	0,489379425	
	4			0,15873016	1,04617605	0,07215007	0	0	0	0	0,182436611	
	5			0,37555228	2,48159057	0,14727541	0	0	0	0,02945508	0,433410478	
		4 Ergebnis Mw.		0,330456495	2,228533687	0,133653242	0	0	0,019074861	0,387388326		
		4 Stabw. (s)		0,148606657	0,97086187	0,050215888	0	0	0,017677526	0,169449491		
		7	1	1	0,33088235	2,22794118	0,14705882	0	0	0,02205882	0,389705882	
	2			0,08258258	0,61561562	0,04504505	0	0	0	0,106177606		
	3			0,18950437	1,25364431	0,10204082	0	0	0	0,220741358		
	4			0,02886003	0,3030303	0	0	0	0	0,047412905		
	5			0,20618557	1,38438881	0,10309278	0	0	0	0,241952451		
		7 Ergebnis Mw.		0,167602981	1,156924043	0,079447494	0	0	0,004411765	0,20119804		
		7 Stabw. (s)		0,117373885	0,746713142	0,057306812	0	0	0,009865006	0,132530016		
		14	1	1	0,33823529	1,02941176	0,19117647	0	0	0,02205882	0,225840336	
	2			0,09009009	0,57057057	0,06006006	0	0	0	0,102960103		
	3			0,18950437	1,10787172	0,10204082	0	0	0	0,199916701		
	4			0,05050505	0,34632035	0	0	0	0	0,056689342		
	5			0,23564065	1,45802651	0,13254786	0	0	0	0,26088786		
		14 Ergebnis Mw.		0,180795091	0,902440182	0,097165042	0	0	0,004411765	0,169258869		
		14 Stabw. (s)		0,115189188	0,443397896	0,072338944	0	0	0,009865006	0,086030027		
		21	1	1	0,15441176	1,04411765	0,08823529	0	0,08823529	0,196428571		
	2			0,02252252	0,31531532	0	0	0,03003003	0,052525553			
	3			0,08017493	0,55393586	0,05102041	0	0,05102041	0,105164515			
	4			0	0,23088023	0	0	0,02164502	0,036075036			
	5			0,12518409	0,72901325	0,05891016	0	0,06627393	0,139911635			
		21 Ergebnis Mw.		0,076458662	0,574652462	0,039633173	0	0,051440937	0,106026462			
		21 Stabw. (s)		0,065611925	0,327905891	0,038746014	0	0,027019636	0,065334046			
		28	1	1	0,08823529	0,63970588	0,05882353	0	0,05147059	0,119747899		
	2			0	0,25525526	0	0	0,02252252	0,03968254			
	3			0,05830904	0,40816327	0	0	0,03644315	0,071845065			
	4			0	0,17316017	0	0	0	0,024737168			
	5			0,08100147	0,53019146	0,04418262	0	0,04418262	0,099936882			
		28 Ergebnis Mw.		0,045509161	0,401295207	0,02060123	0	0,030923776	0,071189911			
		28 Stabw. (s)		0,042986134	0,191620931	0,028680386	0	0,020342646	0,039797197			
		35	1	1	0,06617647	0,51470588	0,04411765	0	0,04411765	0,095588235		
	2			0	0,1951952	0	0	0	0,027885028			
	3			0,02186589	0,30612245	0	0	0,02915452	0,051020408			
	4			0	0,14430014	0	0	0	0,020614306			
	5			0,05154639	0,39764359	0	0	0,03681885	0,069429834			
		35 Ergebnis Mw.		0,02791775	0,311593453	0,008823529	0	0,022018203	0,052907562			
		35 Stabw. (s)		0,030072699	0,150187236	0,019730012	0	0,020784454	0,030688631			
		42	1	1	0,02941176	0,41176471	0	0	0,03676471	0,068277311		
	2			0	0,15765766	0	0	0	0,022522523			
	3			0	0,26239067	0	0	0,02915452	0,041649313			
	4			0	0,11544012	0	0	0	0,016491445			
	5			0,02945508	0,30927835	0	0	0,02945508	0,052598359			
		42 Ergebnis Mw.		0,011773369	0,2513063	0	0	0,019074861	0,04030779			
		42 Stabw. (s)		0,01621357	0,118806787	0	0	0,017677526	0,021323027			
		Ges.-Ergebnis Mw.		0,14485367	1,04151145	0,0633672	0,00252525	0,01760225	0,00641117	0,182324427		
		Ges.-Stabw. (s)		0,12664823	0,87582889	0,05325315	0,00714249	0,01802286	0,00941952	0,150792608		
	Zusammenstellung Ergebnis:											
	Massenverlust in µg/cm² nach:											
		1.Tag		0,31831582	2,50534628	0,1276139	0,02020202	0	0,01736019	0,023391	0,430318459	
		2.-4. Tag		0,33045649	2,22853369	0,13365324	0	0	0,01907486	0,387388326		
		3.-7. Tag		0,16760298	1,15692404	0,07944749	0	0	0,00441176	0,20119804		
		8.-14. Tag		0,18079509	0,90244018	0,09716504	0	0	0,00441176	0,169258869		
		15.-21. Tag		0,07645866	0,57465246	0,03963317	0	0,05144094	0	0,106026462		
		22.-28. Tag		0,04550916	0,40129521	0,02060123	0	0,03092378	0	0,071189911		
		29.-35. Tag		0,02791775	0,31159345	0,00882353	0	0,0220182	0	0,052907562		
		36.-42. Tag		0,01177337	0,2513063	0	0	0,01907486	0	0,04030779		
		Massenverlust gesamt:		1,15882933	8,33209162	0,50693761	0,02020202	0	0,14081797	0,05128939	1,458595419	
Massenverlust in µg/cm² kumulierend												
	nach 1 Tag		0,31831582	2,50534628	0,1276139	0,02020202	0	0,01736019	0,023391	0,430318459		
	nach 4 Tagen		0,64877231	4,73387997	0,26126714	0,02020202	0	0,01736019	0,04246586	0,817706785		
	nach 7 Tagen		0,81637529	5,89080401	0,34071463	0,02020202	0	0,01736019	0,04687763	1,018904826		
	nach 14 Tagen		0,99717039	6,79324419	0,43787968	0,02020202	0	0,01736019	0,05128939	1,188163694		
	nach 21 Tagen		1,07362905	7,36789666	0,47751285	0,02020202	0	0,06880113	0,05128939	1,294190156		
	nach 28 Tagen		1,11913821	7,76919186	0,49811408	0,02020202	0	0,0997249	0,05128939	1,365380067		
	nach 35 Tagen		1,14705596	8,08078532	0,50693761	0,02020202	0	0,12174311	0,05128939	1,418287629		
	nach 42 Tagen		1,15882933	8,33209162	0,50693761	0,02020202	0	0,14081797	0,05128939	1,458595419		

Tabelle 38: Messergebnisse und Standardabweichungen der Legierung Co-4 im statischen Immersionstest

Legierung Co-4			Elektrolyt: 0,1 M NaCl-Milchsäure									
Mittelwert von Massenverlust in µg/cm²			Element									
Legierung	Tag	Probe	Mo	Co	Cr	Mn	Nb	Si	W	Gesamtergebnis		
Co-4	1	1	0	1,18804665	0,10204082		0	0	0	0,30612245	0,228029988	
		2	0	0,76283988	0,0755287		0	0	0	0,16616314	0,143504532	
		3	0	1,43175074	0,16320475	0,04451039		0	0,02225519	0,34866469	0,287197965	
		4	0	1,47314949	0,1161103		0	0	0	0,37735849	0,28094547	
		5	0	1,10534125	0,07418398		0	0	0	0,26706231	0,206655362	
		1 Ergebnis Mw.		0	1,192225601	0,106213709	0,008902077		0	0,004451039	0,293074217	0,229266663
		1 Stabw. (s)		0	0,286456357	0,03650619	0,01990565		0	0,009952825	0,082382394	0,058937845
	4	1	0	0,26239067		0	0	0	0	0,05102041	0,044773011	
		2	0	0,24169184		0	0	0	0	0,02265861	0,03776435	
		3	0	0,3264095		0	0	0	0	0,05934718	0,055108097	
		4	0	0,47169811	0,10159652		0	0	0	0,09433962	0,095376322	
		5	0	0,26706231		0	0	0	0	0,02225519	0,041331072	
		4 Ergebnis Mw.		0	0,313850487	0,020319303		0	0	0,049924203	0,054870571	
		4 Stabw. (s)		0	0,093698609	0,045435344		0	0	0,029881894	0,02355514	
	7	1	0	0,10204082		0	0	0	0	0	0,014577259	
		2	0	0,12084592		0	0	0	0	0	0,017263703	
		3	0	0,10385757		0	0	0	0	0	0,014836795	
		4	0	0,14513788		0	0	0	0	0	0,020733983	
		5	0	0,10385757		0	0	0	0	0	0,014836795	
		7 Ergebnis Mw.		0	0,11514795		0	0	0	0	0,016449707	
	7 Stabw. (s)		0	0,018429632		0	0	0	0	0,002632805		
14	1	0	0,11661808		0	0	0	0	0	0,016659725		
	2	0	0,10574018		0	0	0	0	0	0,01510574		
	3	0	0,20771513		0	0	0	0	0,02225519	0,032852904		
	4	0	0,15965167		0	0	0	0	0,02902758	0,026954178		
	5	0	0,14836795		0	0	0	0	0	0,021195422		
	14 Ergebnis Mw.		0	0,147618602		0	0	0	0,010256554	0,022553594		
	14 Stabw. (s)		0	0,0402237		0	0	0	0,014247011	0,007373835		
21	1	0	0,0728863		0	0	0	0	0	0,010412328		
	2	0	0,0755287		0	0	0	0	0	0,010789814		
	3	0	0,13353116		0	0	0	0	0	0,01907588		
	4	0	0,10159652		0	0	0	0	0	0,014513788		
	5	0	0,25222552	0,05934718		0	0,02225519	0,05934718	0,056167868			
	21 Ergebnis Mw.		0	0,127153638	0,011869436		0	0,004451039	0,011869436	0,022191936		
	21 Stabw. (s)		0	0,074072419	0,026540866		0	0,009952825	0,026540866	0,019311883		
28	1	0	0,05830904		0	0	0	0	0	0,008329863		
	2	0	0,06042296		0	0	0	0	0	0,008631852		
	3	0	0,17804154		0	0	0	0	0	0,025434506		
	4	0	0,07256894		0	0	0	0	0	0,010366991		
	5	0	0,05934718		0	0	0	0	0	0,008478169		
	28 Ergebnis Mw.		0	0,085737933		0	0	0	0	0,012248276		
	28 Stabw. (s)		0	0,051920715		0	0	0	0,007417245			
35	1	0	0,04373178		0	0	0	0	0	0,006247397		
	2	0	0,04531722		0	0	0	0	0	0,006473889		
	3	0	0,05934718		0	0	0	0	0	0,008478169		
	4	0	0,05805515		0	0	0	0	0	0,008293593		
	5	0	0,04451039		0	0	0	0	0	0,006358627		
	35 Ergebnis Mw.		0	0,050192344		0	0	0	0	0,007170335		
	35 Stabw. (s)		0	0,007801045		0	0	0	0	0,001114435		
42	1	0	0		0	0	0	0	0	0		
	2	0	0		0	0	0	0	0	0		
	3	0	0,05192878		0	0	0	0	0	0,007418398		
	4	0	0,04354136		0	0	0	0	0	0,006220195		
	5	0	0		0	0	0	0	0	0		
	42 Ergebnis Mw.		0	0,01909403		0	0	0	0	0,002727719		
	42 s Stabw. (s)		0	0,026313205		0	0	0	0	0,003759029		
	Ges.-Ergebnis Mw.		0	0,25637757	0,01730031	0,00111276		0	0,00111276	0,04564055	0,04593485	
	Ges.-Stabw. (s)		0	0,38831532	0,03672427	0,00314736		0	0,00206043	0,10139493	0,075757614	
Zusammenstellung Ergebnis:												
Massenverlust in µg/cm² nach:												
		1.Tag	0	1,1922256	0,10621371	0,00890208		0	0,00445104	0,29307422	0,229266663	
		2.-4. Tag	0	0,31385049	0,0203193		0	0	0,0499242	0,054870571		
		3.-7. Tag	0	0,11514795		0	0	0	0	0,016449707		
		8.-14. Tag	0	0,1476186		0	0	0	0,01025655	0,022553594		
		15.-21. Tag	0	0,12715364	0,01186944		0	0,00445104	0,01186944	0,022191936		
		22.-28. Tag	0	0,08573793		0	0	0	0	0,012248276		
		29.-35. Tag	0	0,05019234		0	0	0	0	0,007170335		
		36.-42. Tag	0	0,01909403		0	0	0	0	0,002727719		
		Massenverlust gesamt:	0	2,05102059	0,13840245	0,00890208		0	0,00890208	0,36512441	0,3674788	
Massenverlust in µg/cm² kumulierend												
		nach 1 Tag	0	1,1922256	0,10621371	0,00890208		0	0,00445104	0,29307422	0,229266663	
		nach 4 Tagen	0	1,50607609	0,12653301	0,00890208		0	0,00445104	0,34299842	0,284137234	
		nach 7 Tagen	0	1,62122404	0,12653301	0,00890208		0	0,00445104	0,34299842	0,300586941	
		nach 14 Tagen	0	1,76884264	0,12653301	0,00890208		0	0,00445104	0,35325497	0,323140535	
		nach 21 Tagen	0	1,89599628	0,13840245	0,00890208		0	0,00890208	0,36512441	0,34533247	
		nach 28 Tagen	0	1,98173421	0,13840245	0,00890208		0	0,00890208	0,36512441	0,357580746	
		nach 35 Tagen	0	2,03192656	0,13840245	0,00890208		0	0,00890208	0,36512441	0,364751081	
		nach 42 Tagen	0	2,05102059	0,13840245	0,00890208		0	0,00890208	0,36512441	0,3674788	

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe bzw. unerlaubte Hilfsmittel angefertigt, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzen Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ines Miriam Kästle

Schwenningen, den 22.10.2013

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz besonders bei Herrn Prof. Dr. J. Geisgerstorfer für die freundliche Stellung des interessanten Themas und die stete Unterstützung und Betreuung bedanken.

Darüber hinaus möchte ich mich auch bei Frau C. Schille, die mir während der gesamten Versuchsdurchführung immer unterstützend zur Seite stand, recht herzlich bedanken. Das ZZMK der Universität Tübingen kann wirklich stolz sein, eine so motivierte und fleißige Mitarbeiterin zu haben.

Danken möchte ich auch Herrn Dr. G. Hausch für die Bereitstellung der Legierungs-Prüfkörper.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn E. Schweizer für die analytische Auswertung mittels ICP-OES bedanken.

Zum Schluss möchte ich mich nochmals bei allen Mitarbeitern der Abteilung Sektion Medizinische Werkstoffkunde und Technologie des Universitätsklinikum Tübingen bedanken. Denn nicht zuletzt hatte die freundliche Atmosphäre innerhalb der Abteilung einen erheblichen Anteil am Gelingen dieser Arbeit.