

Schlussbericht

für den Zeitraum 01.06.2009 bis 31.10.2011

zum AiF Forschungsvorhaben 16049 N / 1

mit dem Thema:

Technische und wirtschaftliche Alternativen zu den klassischen nichtrostenden, austenitischen Stählen unter atmosphärischen Einsatzbedingungen

FST:	BAM Bundesanstalt für Material- forschung und -prüfung 6.1 Korrosion und Korrosionsschutz Unter den Eichen 87 12205 Berlin	Hochschule Konstanz Technik, Wirtschaft und Gestaltung Fakultät Maschinenbau Brauneggerstraße 55 78462 Konstanz
Projektleiter:	Dr.-Ing. Andreas Burkert	Prof. Dr.-Ing. Paul Gümpel
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. (FH) Jens Lehmann Dipl.-Ing. Annette Burkert Dipl.-Ing. (FH) Christina Zietelmann Tatjana Bohlmann	B. Eng. Florian Leu Dipl.-Ing. Cristina Hoffmann

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
1 Einleitung.....	2
2 Verwendete Werkstoffe.....	4
3 Durchgeführte Untersuchungen.....	7
3.1 Auslagerung in natürlichen Klimaten.....	7
3.1.1 Stadtatmosphäre ^(BAM)	7
3.1.2 Meeresatmosphäre ^(BAM, HTWG)	8
3.1.3 Schwimmhalle ^(HTWG)	9
3.1.4 Lebensmittelindustrie ^(HTWG)	11
3.2 Auslagerung in künstlichen Klimaten.....	13
3.2.1 Kombinierte Klimaprüfung ^(BAM)	13
3.2.2 Kesternichtest ^(HTWG)	14
3.2.3 Spannungsrisskorrosionsversuche ^(BAM)	16
3.2.4 Auslagerung in Erde ^(HTWG)	17
3.2.5 Industrielle Reiniger- und Desinfektionslösungen ^(HTWG)	18
3.2.6 Natriumhypochlorid ^(HTWG)	20
3.3 Elektrochemische Untersuchungen.....	21
3.3.1 Potentiodynamische Polarisationsmessungen ^(BAM)	22
3.3.2 Spaltkorrosionsversuche ^(BAM)	23
4 Ergebnisse.....	24
4.1 Ergebnisse der Auslagerung in natürlichen Klimaten.....	24
4.1.1 Stadtatmosphäre ^(BAM)	24
4.1.2 Meeresatmosphäre ^(BAM)	27
4.1.3 Schwimmhalle ^(HTWG)	34
4.1.4 Lebensmittelindustrie ^(HTWG)	38
4.2 Ergebnisse der Auslagerung in künstlichen Klimaten.....	40
4.2.1 Kombinierte Klimaprüfung ^(BAM)	40
4.2.2 Kesternichtest ^(HTWG)	42
4.2.3 Spannungsrisskorrosionsversuche ^(BAM)	48
4.2.4 Auslagerung in Erde ^(HTWG)	49
4.2.5 Industrielle Reiniger- und Desinfektionslösungen ^(HTWG)	50
4.2.6 Natriumhypochlorid ^(HTWG)	51
4.3 Ergebnisse der elektrochemischen Untersuchungen.....	54
4.3.1 Potentiodynamische Polarisationsmessungen ^(BAM)	54

4.3.2	Spaltkorrosionsversuche ^(BAM)	58
5	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	59
5.1	Marktsituation Lean Duplex ^(HTWG)	60
6	Diskussion der Ergebnisse	63
	Literatur.....	70
7	Gegenüberstellung der Ergebnisse zu den vorgegebenen Zielen	71
8	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	73
8.1	Durchgeführte und geplante spezifische Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Vorhabens:	73
8.2	Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit.....	74
9	Einsatz von wissenschaftlichem Personal und Geräten mit einem Beschaffungswert über 2.500 €	74
10	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	75
	Förderhinweis und Danksagung.....	75

Zusammenfassung

Durch die durchgeführten systematischen Labor- und Auslagerungsuntersuchungen ist es möglich sieben unterschiedliche nichtrostende Stahllegierungen hinsichtlich verschiedenster Anwendungen untereinander und auch im Bezug auf zwei austenitische Standardwerkstoffe (1.4301, 1.4404) zu vergleichen. Die parallele Untersuchung von 5 verschiedenen Oberflächenausführungen der jeweiligen Werkstoffe ermöglicht in gewissem Maße zudem branchenspezifische Besonderheiten der Oberflächenausführung beim Werkstoffvergleich zu berücksichtigen. Der Einfluss der Oberflächenausführung wird überwiegend bei den Ergebnissen der Auslagerungsversuche in kritischen Atmosphären sichtbar, weniger bei den elektrochemischen Untersuchungen.

Die drei Vertreter aus dem Bereich der Duplexstähle zeigten unter den meisten Untersuchungsbedingungen eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit. Insbesondere für Anwendungen im Bauwesen können die Lean-Duplex-Stähle deutliche Vorteile bieten. Bei moderaten Temperaturen $<50\text{ °C}$ ist ihre Beständigkeit gegen chloridinduzierte Lochkorrosion höher, als die der heute überwiegend eingesetzten austenitischen CrNi-Stähle, sie zeigen keine Anfälligkeit gegenüber chloridinduzierter Spannungsrisskorrosion und haben gleichzeitig eine deutlich höhere Grundfestigkeit als die Austenite. Dies ermöglicht geringere Querschnitte, fördert den Leichtbau und spart damit Ressourcen an Rohstoffen. Die vorliegenden Ergebnisse deuten darauf hin und dass ein hoher Chromgehalt eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit sichert, dass für eine gute Repassivierung nach einem Durchbruch der Passivschicht die Elemente Nickel und auch Molybdän wichtig sind. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass bei der angewandten elektrochemischen Untersuchungsmethode der Duplexstahl 1.4362 (X2CrNiN23-4) bis zu einer Temperatur von 50 °C ein besseres Repassivierungsverhalten zeigt als der austenitische CrNiMo-Stahl 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2). Bei höheren Einsatztemperaturen ändern sich die Verhältnisse zugunsten des austenitischen Stahles.

Der Manganaustenit 1.4376 sowie der Ferrit 1.4509 sind nur eingeschränkt als Alternativen geeignet, da die Werkstoffe bei einigen Versuchen signifikante Schwächen zeigten. Für diese Werkstoffe ist in jedem Fall eine spezifische Prüfung unter einsatzrelevanten Randbedingungen sowie Praxiserprobung anzuraten. Der ferritische Werkstoff 1.4003 stellt für die innerhalb des Vorhabens gewählten Prüfbedingungen in keinem Fall eine Alternative zum Einsatz austenitischer nichtrostender Stähle dar. Seine Verwendung ist nur für Einsatzgebiete mit schwach korrosiver Belastung und ohne optische und hygienische Anforderungen sowie ggf. mit eingeschränkter Nutzungsdauer bzw. unter bestimmten Randbedingungen, wie z.B. unter alkalischen Umgebungsbedingungen im Beton möglich. Der Werkstoff 1.4003 kann allerdings eine Alternative für die Verwendung verzinkter Stähle darstellen.

Hinsichtlich der geprüften Verarbeitungsvarianten Abkantung und Schweißverbindung konnte im Bereich der Abkantungen kein verstärkter Korrosionsangriff gegenüber dem Ausgangszustand festgestellt werden. Im Bereich der Schweißnähte und der Wärmeeinflusszone gab es dagegen unterschiedlich ausgeprägte Abweichungen im Korrosionsverhalten.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

1 Einleitung

Die Rohstoffpreise sind seit einigen Jahren starken Schwankungen unterworfen und weisen insgesamt eine deutlich steigende Tendenz auf. Gleichzeitig ist der Preisdruck für Fertigprodukte durch die Konkurrenz auf den Absatzmärkten sehr hoch. Für den Bereich der weit verbreitet eingesetzten austenitischen nichtrostenden Stähle, wie Werkstoff Nr. 1.4301 (X5CrNi18-10) bzw. Werkstoff Nr. 1.4571 (X6CrNiMoTi17-12-2) gab es im Jahr 2007 einen extremen Preisanstieg. So betrug der Legierungszuschlag für eine Tonne des Werkstoffs 1.4301 im Jahr 2002 ca. 200 € und für den Werkstoff 1.4571 ca. 300 €. Die Preise wurden ein- oder zweimal im Jahr angepasst. Heute erfolgt eine monatliche Anpassung wobei die Preisspannen in den letzten 5 Jahren zwischen 500 und 3.500 € für den Werkstoff 1.4301 bzw. zwischen 1.000 und 6.000 € für den Werkstoff 1.4571 liegen. Für Superaustenite, wie z.B. den Werkstoff 1.4529, bewegte sich der Legierungszuschlag in dieser Zeit sogar zwischen 2.500 und 13.200 €/t. [1]

Dieser Umstand führt bei immer mehr Verarbeitern von Edelstahl Rostfrei in Deutschland zur Suche nach alternativen Werkstoffen, um die Wettbewerbsfähigkeit auch zukünftig sicherzustellen. In erster Linie wird nach Alternativen im Bereich der nichtrostenden Stähle gefragt. In verschiedenen Anwendungsbereichen führt die Entwicklung aber auch dazu, dass in bewährten Anwendungsbereichen nichtrostender Stähle auf alternative Werkstoffe (z.B. verzinkt und beschichtet) ausgewichen wird. Diese können die besondere Eigenschaftskombination der nichtrostenden Stähle nicht in allen Anwendungsfällen gewährleisten (z.B. Verschleißbeständigkeit, Verhalten bei Beschädigung der Oberfläche) und können dadurch ggf. später höhere Unterhaltskosten mit sich bringen.

Für die hohen Kosten bei den austenitischen Werkstoffen sind in erster Linie die Legierungselemente Nickel (Ni) und Molybdän (Mo) entscheidend. Das Hinzulegieren von 10 % Nickel bzw. 2 % Molybdän verteuern derzeit die Tonne nichtrostenden Edelstahls jeweils um ca. 1.000 €. Alternativen im Bereich der nichtrostenden Stähle können demnach nur Werkstoffe mit abgesenkten Nickel- und/oder Molybdängehalten sein. Gleichzeitig muss jedoch die Korrosionsbeständigkeit für den jeweiligen Einsatzfall sichergestellt werden. Innerhalb verschiedener Werkstoffgruppen (Ferrite, Austenite, Duplex) wurden im Rahmen des Vorhabens potentiell geeignete Legierungen untersucht, die die in der Praxis vorkommenden unterschiedlichen Anforderungsprofile von Seiten des Korrosionsschutzes erfüllen und gleichzeitig eine für den jeweiligen Anwendungsfall preislich interessante Alternative darstellen können. So kann z.B. durch den Ersatz des Werkstoffes 1.4571 durch einen geeigneten Duplexstahl wie z.B. den Werkstoff 1.4362 (X2CrNiN23-4) der Legierungszuschlag um bis zu 1.500 €/t verringert werden, was etwa einer Halbierung der reinen Materialkosten gleichkommt.

Für die genannten Werkstoffgruppen gibt es, mit Ausnahme der Duplexstähle (z.B. Werkstoff Nr. 1.4362, X2CrNiN23-4) bislang so gut wie keine praktischen Anwendungserfahrungen und nur wenige systematische Korrosionsuntersuchungen für verschiedene Einzelanwendungen. Die bisher vorliegenden Untersuchungen zur Korrosionsbeständigkeit von Legierungen außerhalb der typischen Vertreter der austenitischen Werkstoffe beziehen sich vorwiegend auf Anwendungen in der chemischen Industrie bzw. der Verfahrenstechnik, die für Aussagen zum Korrosionsverhalten unter atmosphärischen Bedingungen nur bedingt geeignet sind.

Zudem basieren die meisten Untersuchungen und Beständigkeitsangaben bisher nur auf Angaben der Stahlhersteller selbst, so dass systematische und insbesondere auch vergleichende Untersuchungen durch unabhängige Forschungsinstitute kaum zu finden sind. Teilweise waren die Werkstoffe bisher auch nicht marktüblich, so dass Halbzeuge nicht oder nicht in der nötigen Breite verfügbar waren. Für einige Legierungen wird in nächster Zeit mit einer deutlich stärkeren Marktpräsenz gerechnet.

Dem Einsatz stehen derzeit noch einige Hürden im Weg. Klein- und mittelständische Firmen, die in vielfältigen Branchen (z.B. Schwimmbadbau, Befestigungsmittel im Bauwesen, Treppenbau) fast ausschließlich mit den typischen Vertretern austenitischer Werkstoffe arbeiten, brauchen für Anwendungen im bauaufsichtlich geregelten Bereich jeweils eigenständige Prüfungen und Zulassungen. Aber auch außerhalb des bauaufsichtlich geregelten Bereiches ist das Interesse groß. So z.B. für Innenraumanwendungen mit korrosiver Belastung wie z.B. in der Medizintechnik (Schränke, Arbeitstische), bei Ausrüstungen für die Nahrungsmittelindustrie (Arbeitsflächen, Verkleidungen) und für Zulieferprodukte in verschiedenen Branchen (z.B. Automobilbau). Die Anfragen haben sich in den letzten Jahren ständig erhöht. Jedoch sind ohne entsprechende Erfahrungen und Kenntnisse zum Werkstoffverhalten alternative Werkstoffe auch bei den Kunden kaum durchzusetzen und werden deshalb von den Herstellern von Edelstahlprodukten selbst praktisch nicht angeboten.

Bei den Möglichkeiten der Materialsubstitution gilt zu beachten, dass eine deutliche Ausweitung der Angebotsbreite an Legierungen auch einige Nachteile mit sich bringt. So stellt sich stets die Frage nach der Marktverfügbarkeit der verschiedenen Halbzeuge und Abmessungen insbesondere bei Nachfrage kleinerer Mengen. Weiterhin steigen die Anforderungen an die Lagerhaltung und die Beachtung möglicher Besonderheiten bei der Verarbeitung der Werkstoffe, welche höhere Kosten verursachen und dadurch den erzielten Vorteile bei den Rohstoffpreisen entgegenstehen. Nicht zuletzt können auch Probleme beim Recycling auftreten, wenn z.B. ein größerer Anteil höher manganlegierter Stähle in den Prozess zurückgeführt wird. Aus diesen Gründen ist es nicht möglich, aus der breiten Palette normierter Stähle beliebig viele Sorten für die praktische Anwendung vorzusehen. Vielmehr müssen durch geeignete Untersuchungen wenige gezielte alternative Legierungen ermittelt werden, die ein möglichst breites Anwendungsspektrum abdecken und gleichzeitig dem Markbedarf nach kostengünstigeren Alternativen entsprechen. Nur dadurch kann die Nachfrage so kanalisiert werden, dass sich entsprechende Chargen wirtschaftlich erschmelzen lassen und eine ausreichende Verfügbarkeit entsprechender Halbzeuge gewährleistet werden kann.

2 Verwendete Werkstoffe

Für die durchgeführten Untersuchungen sind insgesamt 9 unterschiedliche Werkstoffe ausgewählt worden, wobei die Standardaustenite 1.4301 und 1.4404 als Referenzwerkstoffe dienen. Als Alternativwerkstoffe kamen neben drei Lean-Duplex Werkstoffen, drei Ferrite sowie ein Manganaustenit zum Einsatz (Tab. 1). Einige der gewählten Werkstoffe sind branchenspezifisch bereits als zugelassene Werkstoffe eingeführt, so z.B. 1.4362, 1.4003 in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung [2] oder der 1.4521 mit DVGW Zulassung im Trinkwasserbereich. In anderen Branchen fehlen für diese Werkstoffe jedoch die Anwendungserfahrungen.

Tab. 1: Untersuchungsmaterialien

Werkstoffnummer	Kurzbezeichnung	Wirksamkeit W* (Normbereich)	Bemerkungen	
1	1.4301	X5CrNi18-10	18 (17 – 20)	Austenit, KWK II, Referenz
2	1.4404	X2CrNiMo17-12-2	23 (23 – 27)	Austenit, KWK III, Referenz
3	1.4003	X2CrNi12	11 (11 – 13)	Ferrit, KWK I
4	1.4162	X2CrMnNiN22-5-2	25 (25 – 29)	Lean Duplex, Mangan
5	1.4062	X2CrNiN22-2	26 (25 – 30)	Lean Duplex
6	1.4362	X2CrNiN23-4	25 (23 – 29)	Lean Duplex, KWK III
7	1.4509	X2CrTiNb18	18 (18 – 19)	Ferrit
8	1.4521	X2CrMoTi18-2	24 (23 – 28)	Ferrit, Molybdän
9	1.4376	X8CrMnNi19-6-3	18 (17 – 20)	Austenit, Mangan

*) $W = \% Cr + 3,3 \cdot \% Mo + x \cdot \% N$ (Mo \geq 1,0 % ; Austenit/Ferrit: x=0 ; Duplex : x=16)

Eine Möglichkeit zum Werkstofffranking hinsichtlich der Lochkorrosionsbeständigkeit ist die Ermittlung der Wirksamkeit (W). Diese gibt Anhaltspunkte zur Beständigkeit der Werkstoffe und wird in vielen Branchen für die Werkstoffauswahl herangezogen. Für die hier ausgewählten Werkstoffe ist die nach

$$W = \% Cr + 3,3 \cdot \% Mo + x \cdot \% N$$

mit (Mo \geq 1,0 % ; Austenit/Ferrit: x=0 ; Duplex : x=16)

berechnete Wirksamkeit in Tabelle 1 entsprechend der tatsächlichen chemischen Zusammensetzung der Werkstoffe (Tab. 2) angegeben. Zusätzlich ist der mögliche Wirksamkeitsbereich aus den max/min Angaben der jeweiligen normativen Legierungszusammensetzung [3] errechnet worden.

Die legierungsspezifischen Angaben aus den mitgelieferten 3.1 Werkzeugeugnissen sind in Tabelle 2 aufgetragen. Die Werkstoffe entsprechen in ihrer chemischen Zusammensetzung den normativen Forderungen der DIN EN 10088-1 [3]. Die Legierungselemente Nickel und Molybdän liegen im unteren Grenzbereich der Norm. Zur besseren Veranschaulichung sind die für den Korrosionsschutz wesentlichen Legierungsbestandteile der untersuchten Werkstoffe in Abbildung 1 dargestellt.

Tab. 2: Chemische Zusammensetzung der Werkstoffe; Angaben aus Werkzeugeugnissen

Werkstoff	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	Ti	N
1	1.4301	0,034	0,39	1,29	0,029	0,001	18,28	0,24	8,01	0,428	0,013	0,010
2	1.4404	0,019	0,38	0,88	0,035	0,004	16,65	2,02	10,92	0,260	0,010	0,017
3	1.4003	0,020	0,43	1,03	0,020	0,004	11,16		0,43			0,017
4	1.4162	0,024	0,73	5,06	0,020	0,001	21,42	0,28	1,59	0,340		0,224
5	1.4062	0,022	0,46	1,35	0,025	0,000	22,98	0,22	2,44			0,210
6	1.4362	0,018	0,40	1,47	0,029	0,001	23,32	0,35	4,83	0,240		0,120
7	1.4509	0,017	0,53	0,43	0,025	0,002	17,77	0,02	0,17	0,044	0,360	0,146
8	1.4521	0,019	0,43	0,28	0,025	0,003	17,50	2,00	0,14	0,057	0,270	0,214
9	1.4376	0,042	0,38	6,80	0,024	0,004	17,90	0,15	4,29		0,010	0,013

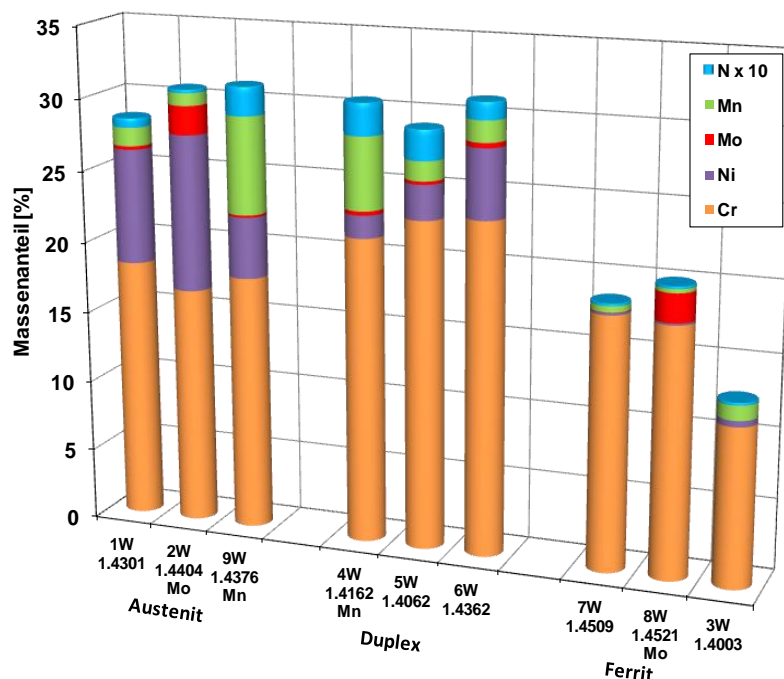


Abb. 1: Legierungsbestandteile Cr, Ni, Mn, Mo und N der untersuchten Werkstoffe

Die Proben aus den o.g. Werkstoffen wurden aus handelsüblichen Blechen hergestellt und hatten abhängig von den Anforderungen der Untersuchungsverfahren unterschiedliche Abmessungen. Die Probengeometrien werden unter der jeweiligen Versuchsbeschreibung aufgeführt. Es kamen insgesamt 5 praxisrelevante Oberflächenausführungen für die Untersuchungen zum Einsatz (Tab. 3).

Tab. 3: Oberflächenausführungen

Oberflächenausführung		Parameter
W	Lieferzustand kalt- oder warmgewalzt, gebeizt + passiviert	Ausgangsoberfläche: 2B (1.4301, 1.4404, 1.4003, 1.4509, 1.4521, 1.4376), 2E (1.4162, 1.4362), 1D (1.4062), Beize: Top Acid A (H ₂ SO ₄ + HF) Passivierung: Pelox RP-Gel (HNO ₃)
TS	Trockenschliff	handgeführter Maschinenschliff, trocken Korn A160 (Trizact, Korund)
GP	Glasperlen gestrahlt	Industrieller Strahlprozess Strahlmittel: AbraVer Glasperlen Feinstrahlmittel Körnung: 70-110 µm
EP	Elektropoliert	Prozessparameter werkstoffspezifisch: 60-80 °C; 15-30 A; 12,5-25 min
S	Verbindungsgeschweißt, gebeizt + passiviert	WIG Verfahren, werkstoffspezifischer Schweißzusatz Beize: Top Acid A (H ₂ SO ₄ + HF) Passivierung: Pelox RP-Gel (HNO ₃)

Als Grundaufbereitung wurden alle Proben im Lieferzustand nach dem Zuschnitt gebeizt und passiviert um einheitliche Ausgangsbedingungen zu schaffen. Von dieser Oberfläche ausgehend wurden die Oberflächenausführungen Trockenschliff „TS“, Glasperlen gestrahlt „GP“ und Elektropoliert „EP“ hergestellt. Die Proben mit Verbindungsschweißnaht „S“ wurden im Lieferzustand im WIG-Schweißverfahren hergestellt und anschließend gebeizt und passiviert. Die entsprechenden Schweißzusatzwerkstoffe für die verschiedenen Werkstoffe sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tab. 4: Verwendete Schweißzusatzstoffe für verbindungsgeschweißte Ausführung „S“

Werkstoff	Schweißverfahren WIG		
	Schweißzusatzwerkstoff	Wst. Nr.	
1	1.4301	W 19 9 Nb	1.4551
2	1.4404	W 19 9 Nb	1.4551
3	1.4003	W 18 8 Mn	1.4370
4	1.4162	W 22 9 3 N L	1.4462
5	1.4062	W 22 9 3 N L	1.4462
6	1.4362	W 22 9 3 N L	1.4462
7	1.4509	W 18 8 Mn	1.4370
8	1.4521	W 19 12 3 L	1.4430
9	1.4376	W 19 9 L	1.4316

3 Durchgeführte Untersuchungen

3.1 Auslagerung in natürlichen Klimaten

Für die Auslagerung in natürlichen Klimaten wurde die in Abbildung 2 dargestellte Probenform verwendet. In Oberflächenausführung *W* wurde bei allen Werkstoffen eine 90° Abkantung vorgesehen, um den Einfluss einer Kaltumformung zu prüfen. Zusätzlich wurde auf der bewitterten Seite bei der Probenbefestigung der Ausführung *W* eine Unterscheibe aus dem Material A4 (1.4401/1.4404) zur Ausbildung eines praxisnahen Metall-Metall Spaltes vorgesehen. Die Befestigungspunkte aller anderen Oberflächenausführungen wurden ohne U-Scheibe realisiert. Als Abstandshalter zwischen Probe und Befestigungsschiene sind Kunststoffröhrchen verwendet worden, durch die ein Metall-Kunststoff-Spalt auf der Probenrückseite ausgebildet wurde. Die Schweißnaht in der Oberflächenausführung „S“ verlief horizontal.

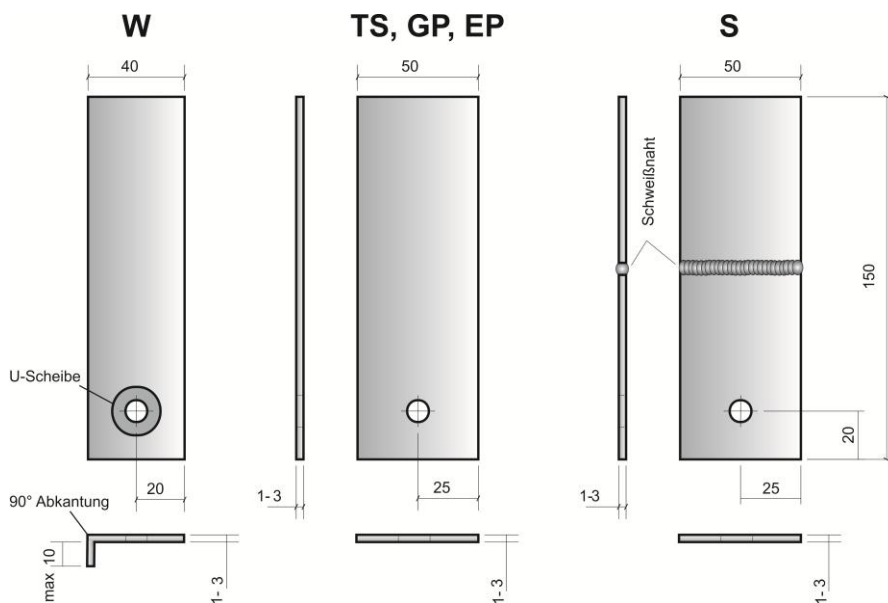


Abb. 2: Probenformen und -abmessungen für Auslagerung in natürlichen Klimaten, Maße in mm

3.1.1 Stadtatmosphäre ^(BAM)

Die Freibewitterungsversuche an Stadtatmosphäre wurden in Anlehnung an die DIN EN ISO 8565 [4] durchgeführt. Hierzu wurden von allen Probenvarianten 3 Vergleichsproben auf Auslagerungsständen der BAM in Berlin montiert (Abb. 3) und über einen Zeitraum von 24 Monaten ausgelagert. Die Bewertung des Oberflächenzustandes erfolgte nach 12 und 24 Monaten an allen Vergleichsproben, die Lochtiefenbestimmung nach 24 Monaten Auslagerungszeit an einer repräsentativen Probe jeder Serie. Die Probenoberflächen waren im Winkel von 45° angeordnet und hatten eine Süd/West Ausrichtung und waren frei beregnet.



Abb. 3: Übersicht Auslagerungsstände auf dem BAM Dach (Stadtatmosphäre)

Der Oberflächenzustand wurde in Anlehnung an die DIN EN ISO 10289 [5] mittels Punkt- bzw. Fleckkarten in Bewertungsgrade 1-10 eingeteilt, wobei mit steigendem Bewertungsgrad ein besserer Oberflächenzustand dokumentiert wird. Diese Bewertungsgrade beziehen sich auf den prozentualen Anteil von Korrosion und Korrosionsprodukten auf der Oberfläche der Proben. Das dabei zugrundeliegende Bewertungsfenster betrug 35 x 35 mm, wobei jeweils der schlechteste Oberflächenbereich einer Probe bewertet wurde. Rand- und Spalteffekte gingen nicht in die Bewertung ein.

Die Proben wurden für die Lochtiefenbestimmung abhängig vom Werkstoff und Korrosionsgrad der Proben in einem Ultraschallbad für 2-24 Stunden in 20 %-iger Phosphorsäure geätzt, um die Korrosionsprodukte zu entfernen. Anschließend sind an 10 Löchern je Probe (sofern vorhanden) die Lochtiefen mikroskopisch bestimmt worden.

3.1.2 Meeresatmosphäre ^(BAM, HTWG)

Für die Freibewitterungsversuche an Meeresatmosphäre sind analog zu den Auslagerungsversuchen an Stadtatmosphäre jeweils 3 Vergleichsproben pro Werkstoff auf Auslagerungsständen auf der Nordsee Insel Helgoland ausgelagert worden (Abb. 4). Die Probenoberflächen waren im Winkel von 45° angeordnet und hatten eine Süd/West Ausrichtung. Lieferungs- und herstellungsbedingt wurden die Proben aus dem Werkstoff 5 (1.4062) sowie die elektropolierten Oberflächenausführungen „EP“ aller Werkstoffe zeitlich verzögert ausgelagert, sodass hier nur eine Bewertung nach 12 Monaten möglich war.

Zur Simulation von Aufkonzentrationseffekten sind in die Stände im unteren Teil überdachte, luftdurchströmte Kammern integriert, in der 2 Vergleichsproben aller Probenvariationen ausgelagert wurden. Hier können sich in der Luft befindliche Schadstoffe (Chloride u.ä.) auf den Probenoberflächen ablagern, jedoch nicht mehr durch Niederschläge abgespült werden. Ab-

weichend von der Probenanordnung im freibewitterten Bereich waren die Proben hier senkrecht hängend montiert.



Abb. 4: Übersicht Auslagerungsstände auf Helgoland (Meeresatmosphäre), überdachte Auslagerung in Kammer (links), freibewitterte Auslagerung (rechts)

Analog zu den Untersuchungen an Stadtatmosphäre wurden die Oberflächenzustände in Anlehnung an [5] ausgewertet. Die Bewertung erfolgte nach 12 und 22 Monaten. Für die Lochtiefenbestimmung wurde nach 22 Monaten eine repräsentative Probe jeder Serie von der freibewitterten und überdachten Auslagerungsvariante entnommen und im Labor näher untersucht. Die Proben wurden für die Lochtiefenbestimmung abhängig vom Werkstoff und Korrosionsgrad der Proben in einem Ultraschallbad für 2-24 Stunden in 20 %-iger Phosphorsäure gebeizt, um die Korrosionsprodukte zu entfernen. Anschließend sind an 10 Löchern je Probe (sofern vorhanden) die Lochtiefen mikroskopisch bestimmt worden.

3.1.3 Schwimmhalle ^(HTWG)

Bei diesem Auslagerungsversuch werden die Proben der verschiedenen Werkstoffe mit den Oberflächen W (Walzoberfläche gebeizt + passiviert), TS (Trockenschliff), GP (Glasperlen gestrahlt) und EP (Elektropoliert) in die üblicherweise leicht chlorhaltige Atmosphäre eines Thermalbads, hier Bodenseetherme in Überlingen am Bodensee ausgelagert. Der Standort wurde so gewählt, dass die Proben der feuchten Atmosphäre ausgesetzt, jedoch nicht von den Reinigungsarbeiten betroffen sind. Der Standort der Exposition befand sich oberhalb der Fensterfronten im Gastronomiebereich auf der Südseite. Dieser befindet sich balkonförmig oberhalb der Schwimm- und Thermalbecken und ist atmosphärisch nicht von der Schwimmhalle abgetrennt (Abb. 5).

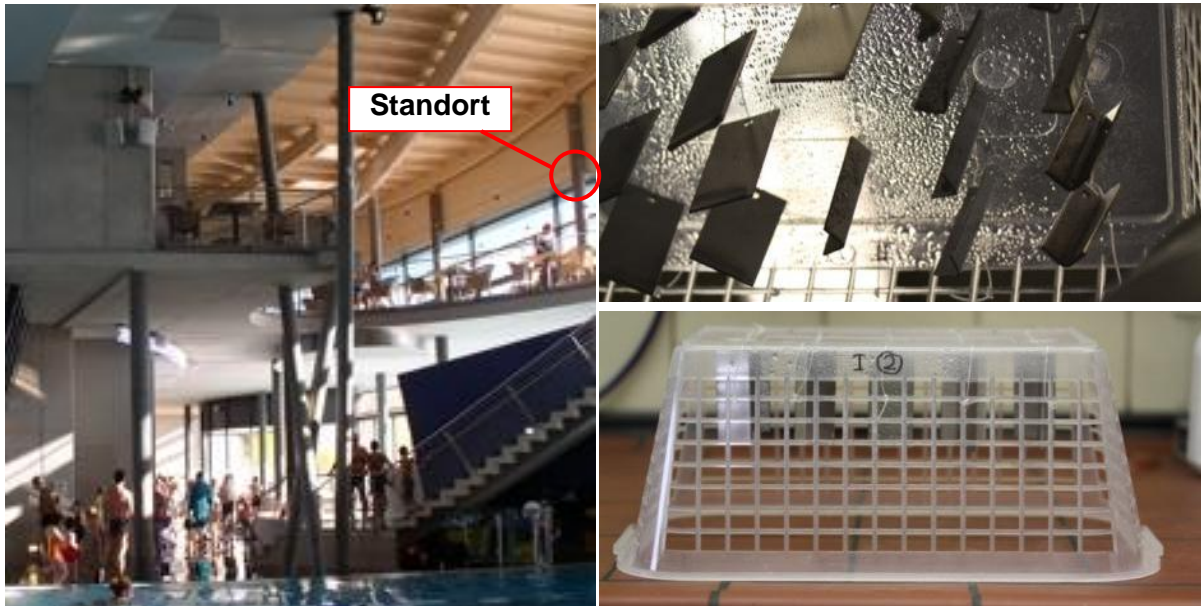


Abb. 5: Auslagerung in Schwimmhalle „Bodenseetherme“

Die Proben wurden mit einem Loch versehen und an einer Nylonschnur in Kunststoffkörben aufgehängt, so dass kein Kontakt zwischen den Proben entstehen konnte. Durch den gewählten Auslagerungsort waren die Proben weder von den Reinigungsarbeiten betroffen noch dem Spritzwasser ausgesetzt.

Die Proben wurden im Ultraschallbad gereinigt und mit Ethanol entfettet. Vor Beginn der Auslagerung wurden die Proben mit 3%-iger NaCl-Lösung besprüht, um eine gleichmäßige, zeitlich beschleunigte Chloridkontamination der Oberflächen zu erreichen, um damit eine bessere Differenzierung der Werkstoffe in der zur Verfügung stehenden Zeit zu erhalten.

Die Atmosphäre im Schwimmbad wird im Wesentlichen durch die Lüftung und durch das Thermalwasser bestimmt. Das 36,2°C warme Wasser trägt die Bezeichnung fluoridhaltiges Natriumhydrogencarbonat – Chlorid Thermalwasser und weist einen pH-Wert von 7,2 auf. Das Wasser wird in zwei Kreisläufen geführt, dem Frischwasserkreislauf und dem Brauchwasser aus den Becken. Zum Brauchwasser fließen stündlich ca. 10 m³ Frischwasser hinzu. Dieses wird aufbereitet und mit Chlor versetzt, um die Bakterien abzutöten. Auch das Beckenwasser wird aufbereitet und durch Chlor desinfiziert. Somit ergibt sich eine chlor- und chloridhaltige Atmosphäre. Die genaue Zusammensetzung der Atmosphärenluft wurde nicht analysiert.

Neben der Zusammensetzung des Wassers wird die Hallenatmosphäre auch durch die bei den Reinigungsarbeiten eingesetzten Reinigungsmittel beeinflusst. In den In der Bodensee-Therme wurden während der Auslagerung verschiedene Reiniger der Firma Dr. Nüsken Chemie GmbH eingesetzt.

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Reiniger, dessen Inhaltsstoffe und Einsatzgebiete wieder.

Tab. 5: Eingesetzte Reinigungsmittel in den Bodenseethermen während der Auslagerung

Produkt	Art	Inhaltsstoffe
FERROCLIN FORTE	Abbeizmittel, Edelstahlreiniger	Phosphorsäure 25-50 %, nichtionische Tenside <5 %, saures Fluorid <5 %
FERROTEC	Ferrungsmittel, Edelstahlpflegeöl	k.A.
Phantax neu	Sanitärreiniger	Anorganische Säuren <10 %, organische Säuren <5 %, anionische Tenside 5 %, Fettalkoholethoxylat <5 %
FETTLÖSER F 100	Alkalischer Badreiniger	Nitilotriacetat, Na-Salz <10 %,

Zur Erfassung der während der Auslagerung herrschenden Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsniveaus, wurden diese Messwerte über den Datenlogger irDAN^{CLIMA_c} der Firma ESYS aufgezeichnet. Dieser wurde so programmiert, dass er alle 30 Minuten den aktuellen Wert der Raumtemperatur in °C und der relative Luftfeuchtigkeit in %, an der Auslagerungsstelle aufzeichnete. Somit lassen sich im Anschluss Rückschlüsse über die atmosphärischen Veränderungen über definierte Zeiträume ziehen. Die Auslagerung wurde am 19.03.2010 gestartet und am 17.05.2011 beendet. Die Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsaufzeichnung erfolgt über den Zeitraum vom 20.11.2010 bis zum 17.05.2011.

3.1.4 Lebensmittelindustrie ^(HTWG)

In Kooperation mit der Firma Multivac AG, einem Hersteller von Verpackungsmaschinen und Verpackungslösungen, unter anderem für die fleischverarbeitende Industrie, wurden Probenbleche in drei unterschiedlichen Betrieben ausgelagert. Den Projektverantwortlichen sind die Betriebe bekannt, werden aber aus Datenschutzgründen hier mit Betrieb A, Betrieb B und Betrieb C aufgeführt. Es handelt sich um drei produzierende Unternehmen mit verschiedenen Produkten. Das Produkt sowie der Auslagerungsort und die Reinigungsbedingungen sind in Tab. 6 zusammengestellt.

Tab. 6: Auslagerungsbedingungen in der Lebensmittelindustrie

	Betrieb A	Betrieb B	Betrieb C
Produkt	Verpackung von Wurstwaren	Fetakäse in Salzlake (55% Wasser, 45% Salz, Zusatz Milchsäure)	Frischfleisch, Rind, Schwein
Auslagerungsort	Im unteren Bereich der Maschine	Im unteren Bereich der Maschine	1. unterhalb Rollenbahn 2. hinter Seitenverkleidung 3. unterhalb Seitenverkleidung
Reinigungsmittel	Fa. Ecolab p3-Schaumreiniger	Fa. Ecolab p3-topax 58 p3-topax 66 p3 oxonia Active	Fa. Johnson Deversey Delladet VS3 Dilacfoam VF13 Fa. Anti Germ GmbH Gemicidan Rapid
Reinigungsintervall	täglich	täglich	täglich
Reinigungszyklus	o.A.	o.A.	1. Vorreinigung H ₂ O 2. Delladet /Dilacfoam 3. Abspülen H ₂ O 4. Gemicidan Desinf. 5. Abspülen H ₂ O 6. Reinigungsende

Auf Grund der hohen Hygienevorschriften in der Lebensmittelbranche wurden von den vier unterschiedlichen Oberflächenzuständen nur die elektropolierten und die kaltgewalzten Proben der verschiedenen Werkstoffe ausgelagert. Die Proben wurden dabei auf einem Proben-träger (Rack), aus für die Lebensmittelindustrie zugelassenem Kunststoff montiert (Abb. 6). Die Proben wurden auf einer Seite mit Silikon in einer Nut fixiert und auf der anderen Seite mit einer Schraube und Unterlegscheibe der Güte V4A befestigt. Somit können die Spaltfekte rund um die Unterlegscheibe bei der Begutachtung mit berücksichtigt werden.



Abb. 6: Probenträger (Racks) für die Auslagerung in der Lebensmittelindustrie

Die Proben wurden im Anlieferungszustand mit den definierten Oberflächen ausgelagert. Nachfolgende Abb. 7 bis 9 zeigen die Auslagerungsorte an den Anlagen

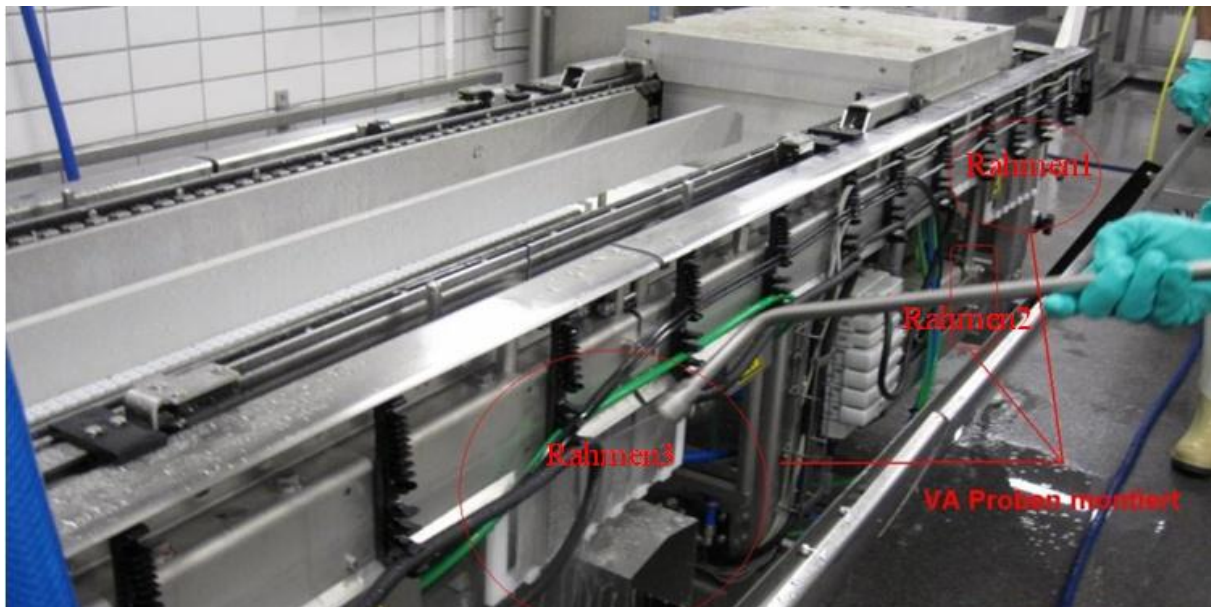


Abb. 7: Auslagerungen an Verpackungsmaschine Betrieb A



Abb. 8: Auslagerungen an Verpackungsmaschine Betrieb B

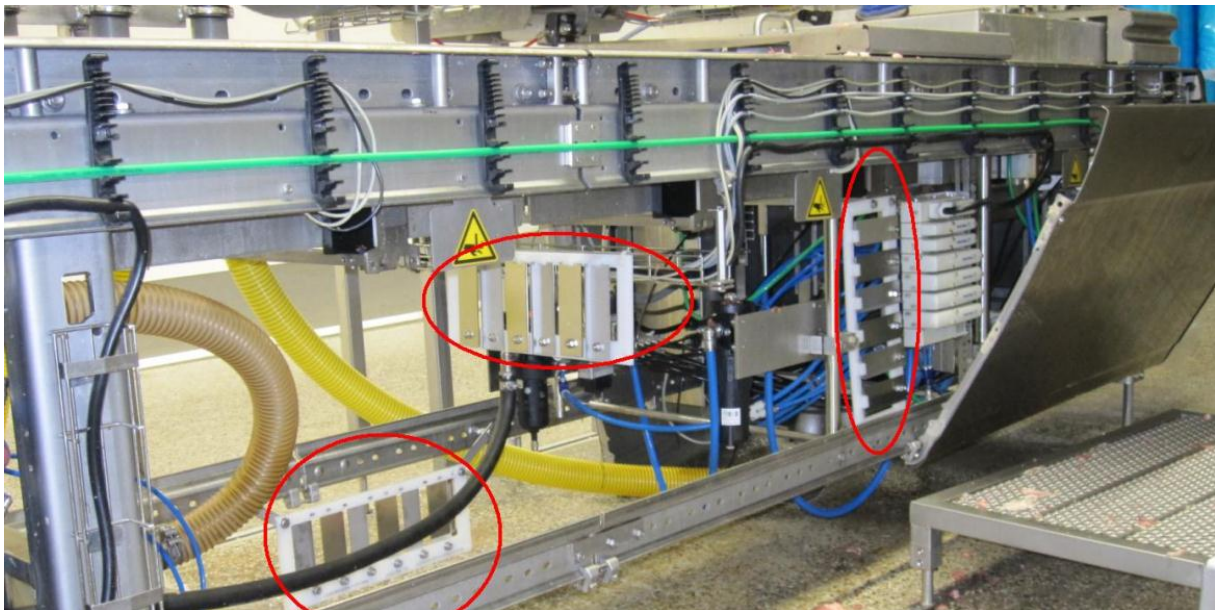


Abb. 9: Auslagerung an Verpackungsmaschine Betrieb C

3.2 Auslagerung in künstlichen Klimaten

3.2.1 Kombinierte Klimaprüfung ^(BAM)

Für die kombinierte Klimaprüfung wurden jeweils drei Vergleichsproben aller Varianten mit einem abgewinkelten Schweißdraht versehen, um eine spaltfreie 45° Anordnung der Proben in den Klimakammern zu realisieren (Abb. 10). Die obere Schnittkante ist zudem mit einem Abdecklack versehen worden. Zunächst erfolgte eine Auslagerung der Proben für 96 Stunden in einer Salzsprühkammer des Typs Liebisch SKBW 1000 A-SC wobei die Proben in einer Salzsprühnebelprüfung nach DIN EN ISO 9227 [6] mit Chloriden beladen wurden. In Abbildung 11 ist die Anordnung der Proben in der Salzsprühkammer dargestellt.

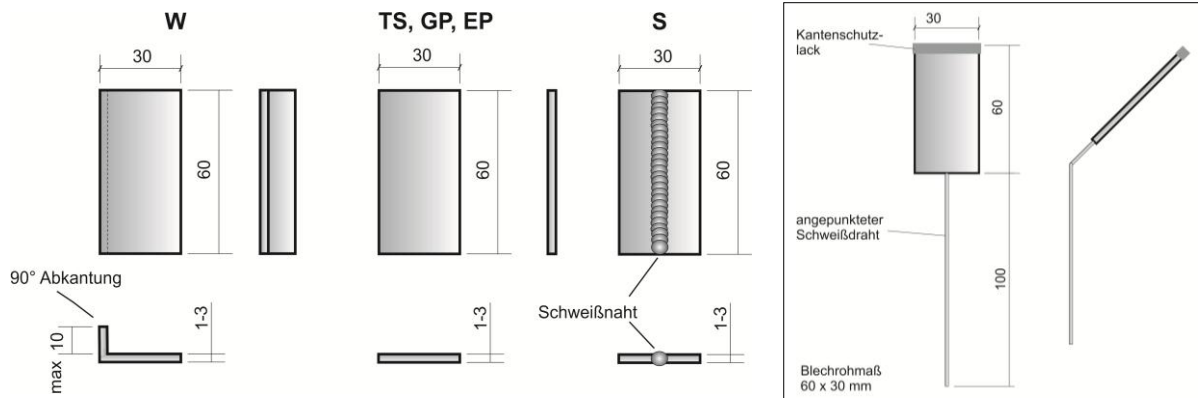


Abb. 10: Probenformen für die kombinierte Klimaprüfung, Maße in mm



Abb. 11: Probenauslagerung in der Salzsprühkammer

Im Anschluss an die 96 h Salzsprühnebelprüfung wurden die Proben mit der Chloridfracht (ohne Reinigung) in einer Klimakammer des Typs Heraeus Vötsch HC2057 bei einem konstanten Klima von 30 °C / 80 % r.F. ausgelagert und nach 4 Wochen abschließend bewertet. Die Bewertung erfolgte dabei, wie schon bei den Auslagerungsversuchen in Stadt- und Meeresatmosphäre in Anlehnung an [5]. Spalt- und Randeffekte wurden nicht in die Bewertung einbezogen.

3.2.2 Kesternichtest ^(HTWG)

Bei diesem Auslagerungsversuch werden die Proben der verschiedenen Werkstoffe mit den Oberflächen W (Walzoberfläche gebeizt + passiviert), TS (Trockenschliff), GP (Glasperlen gestrahlt) und EP (Elektropoliert) in schwefeldioxidhaltiger Atmosphäre ausgelagert. Der Test wird in Anlehnung an DIN 50018 durchgeführt mit der Abwandlung, dass die Proben vor jedem Zyklus mit einer 3%igen Natriumchlorid-Lösung eingesprüht werden. Für die Versuchsreihe wurden die Proben im Anlieferungszustand mit den definierten Oberflächen ausgelagert. Zur Aufhängung wurden die Proben mit einem Loch versehen, welches spa-

nend hergestellt wurde. Vor Probeneinbau wurden die Proben im Ultraschallbad gereinigt und mit Ethanol entfettet.

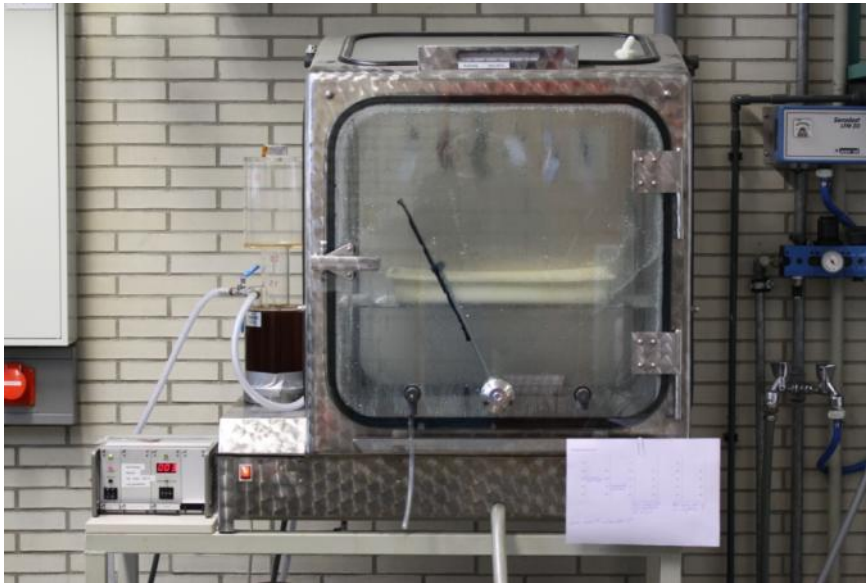


Abb. 12: Probenauslagerung für den Kesternichtest in der Bedampfungskammer

Der Versuch wird in einer normgerechten Bedampfungskammer durchgeführt. Die Proben werden vor Einbau mit einer 3 %-igen Natriumchloridlösung eingesprüht. Nach Antrocknung der Salzlösung auf der Werkstückoberfläche werden die Proben in die Prüfkammer eingebracht. Diese wird anschließend mit Schwefeldioxid (SO_2) begast und für 8 Stunden auf ca. 40°C erhitzt. Die Temperatur wurde über einen Thermostat eingestellt und konnte über zwei Temperaturfühler in der Kammer über dem Becken und am Kammerdach kontrolliert werden. Die Luftfeuchtigkeit in der Prüfkammer liegt dabei bei nahezu 100 % r.F.. Nach dieser Zeit wird die Prüfkammer geöffnet und für weitere 16 Stunden auf Raumtemperatur abgekühlt, so dass die Luftfeuchtigkeit unter 75 % r.F. gehalten wird. Insgesamt wurden mit den Probenblechen 5 Zyklen durchgeführt. Gemäß Vorschrift kann der Versuch nach 5 Zyklen beendet werden. Es stellte sich heraus, dass fünf Testzyklen ausreichen, um eine Differenzierung zwischen den einzelnen Proben und Oberflächen zu erhalten.

Die Probenbleche wurden mit einer Nylonschnur aufgehängt. Da durch sich bildendes Kondensat und das Abtropfen ein Teil der aufgetragenen Salzkristalle abgewaschen wird, befand sich Unterhalb der Proben eine Auffangwanne. Somit konnte eine Verschmutzung des am Kammerboden befindlichen deionisierten Wassers ausgeschlossen werden. Nach der Durchführung der Auslagerung, konnten in der Auffangwanne Wassermengen festgestellt werden, die sich im Toleranzbereich von 200 ml, ausgehend von 2000 ml Flüssigkeit befanden. Somit war während des Versuchs in der Kammer stets genug Wasser zur Verdampfung vorhanden. Die Prüfkammer wurde nach jedem Zyklus mit Klarwasser gereinigt.

Insgesamt wurden zwei Versuche mit unterschiedlicher Schwefeldioxidkonzentration durchgeführt. Bei der ersten Versuchsreihe wurde je 0,2 l SO_2 eingesetzt. Da sich nach der ersten Versuchsreihe kaum Unterschiede zwischen den Proben nach den einzelnen Zyklen zeigten, wurde bei der zweiten Versuchsreihe die zehnfache Mengen, also 2,0 l freies Schwefeldioxid

verwendet. Das Schwefeldioxid mit der Bezeichnung „SO₂ Schwefeldioxid 3.8 UN1079“ stammt von der Firma Grillo-Chemie GmbH, Duisburg.

Zur Beurteilung des Korrosionsangriffs wurden die Probenzustände nach jedem Zyklus photographisch dokumentiert. Hierzu wurden die Korrosionsprodukte weder entfernt noch wurden die Proben gereinigt. Damit wurde der Zweck verfolgt, bestehende Ablagerungen und Salzkristalle auf der Probe zu belassen. Nach Beendigung der Versuche wurden die Probenzustände erneut photographisch dokumentiert.

Zur Bestimmung des Gewichtsverlusts wurden die Proben vor Beginn der Auslagerung und nach Beendigung des 5. Zyklus gewogen. Hierzu wurden die Korrosionsprodukte und andere Fremdstoffe auf der Probenoberfläche mit der Beizpaste Antox entfernt.

3.2.3 Spannungsrissskorrosionsversuche ^(BAM)

Für die Spannungsrissskorrosionsprüfung wurde aus den Versuchsmaterialien 1,5 cm breite Blechstreifen zu Bügeln gebogen und mittels Titanschrauben auf ca. 95 % der Dehngrenze gespannt. Die Ermittlung der Vorspannung erfolgte iterativ in Vorversuchen.

Die Auslagerung erfolgte in temperierbaren Klimaboxen in der sich über einer gesättigten Magnesiumchloridlösung ein Klima von 30 °C / 35 % r.F. einstellt. Die vorgespannten Bügelproben wurden anschließend im äußeren Biegeradius mit jeweils drei MgCl₂-Tropfen versehen, die bei dem eingestellten Klima ihre Sättigungsfeuchte erreichen. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 13 dargestellt.

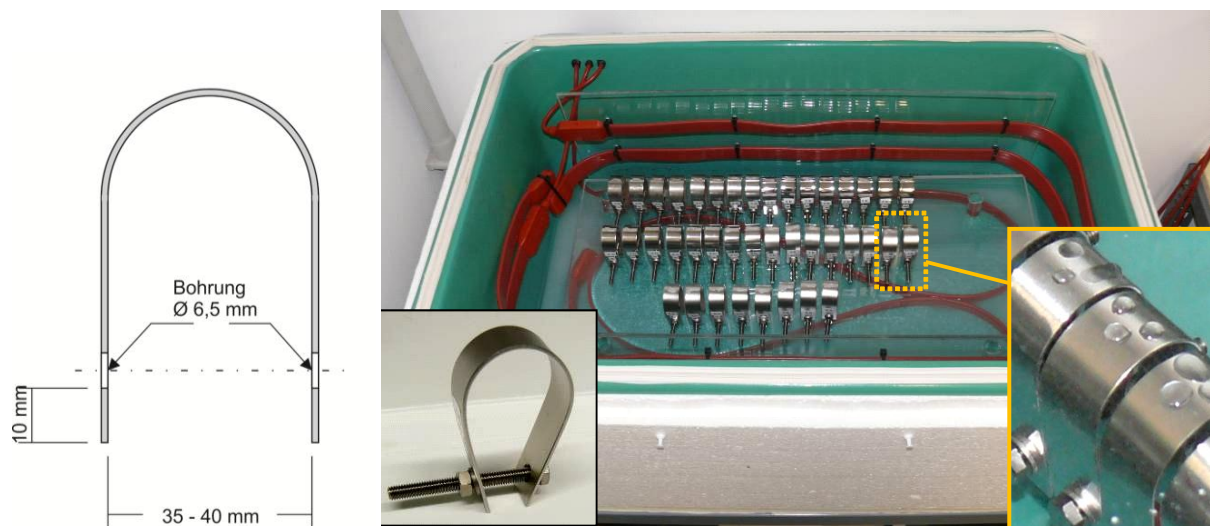


Abb. 13: Probenform für Spannungsrissskorrosionsversuche (links), Auslagerung in Klimabox mit MgCl₂-Tropfen (rechts)

Von allen 9 Werkstoffen wurden die Oberflächenausführungen *W*, *TS* und *GP* geprüft. Nach festgelegten Zeitpunkten (300, 600, 1200, 2400, 4800 h) wurde je Parameter eine Probe entnommen und metallographisch auf Korrosionserscheinungen hin untersucht. Zusätzlich wurde eine Auslagerungszeit 10000 h an allen Werkstoffen mit der Oberflächenausführung *W* untersucht. Zur Untersuchung der Korrosionserscheinungen wurden an den auffälligen

Bereichen metallographische Schliffe angefertigt. Dafür erfolgt ein Querschliff durch die jeweilige Probe und anschließend ein Polieren der Schnittfläche. Im Lichtmikroskop werden dann die oberflächennahen Bereiche vergrößert und abgebildet.

3.2.4 Auslagerung in Erde ^(HTWG)

Bei diesem Auslagerungsversuch werden die Proben der verschiedenen Werkstoffe mit den Oberflächen W (Walzoberfläche gebeizt + passiviert), TS (Trockenschliff), GP (Glasperlen gestrahlt) und EP (Elektropoliert) mit Erde bedeckt und gleichzeitig einem feuchten Klima ausgesetzt. Hierzu wurden die Proben in einem Zimmergewächshaus bis etwa zur Hälfte in Blumenerde gesteckt. Abb. 14 zeigt die Bestückung des Gewächshauses mit je einer Probe jedes Werkstoffs und jeder Oberflächenausführung.



Abb. 14: Auslagerungsversuche in Blumenerde

Die Proben wurden vor Versuchsbeginn im Ultraschallbad gereinigt und mit Ethanol entfettet. Bei der Blumenerde handelte es sich um das Fabrikat *Zimmerpflanzenerde* der Firma *ter-rason Haus- + Gartenbedarf GmbH & Co. KG*. Sie weist nachfolgend aufgeführte Eigenschaften auf:

- pH-Wert 5,9 (CaCl_2) (schwach sauer)
- Salzgehalt 1,7 g/l (KCl)
- Stickstoff N 175 mg/l CaCl_2
- Phosphat P_2O_5 60 mg/l (CAT)
- Kalium K_2O 360 mg/l (CAT)

Damit in dem Gewächshaus ein Feuchtigkeitsniveau entstehen kann, wurden in jedes Fach 20 ml Leitungswasser dazugegeben um die Erde anzufeuchten (insgesamt 720ml). Die Proben wurden anschließend in die Erde gesteckt und die Erde um die Proben herum leicht angedrückt. Der Deckel wurde aufgesetzt und die Lüftungsschlitze mit Klebeband abgedichtet, um über die gesamte Auslagerungszeit eine gleiches Feuchtigkeitsniveau aufrechtzuerhalten. Der Versuch wurde am 22.02.2010 gestartet. Nach ca. einem halben Jahr wurde der Zustand der Proben kontrolliert, es konnten keine Auffälligkeiten festgestellt werden. Daher wurde die Versuchsdurchführung geändert. Ab sofort war die Kammer nicht weiter luftdicht verschlossen, sondern es wurde eine Zirkulation der Luft ermöglicht. Der Verdunstungsverlust wurde durch regelmäßige Zufuhr von Leitungswasser ausgeglichen. Unter den veränder-

ten Bedingungen wurden die Proben vom 07.10.2010 bis zum 06.07.2011 weiter ausgelagert. Vor der Begutachtung der Proben nach Beendigung der Auslagerungsversuche wurden die Probenbleche unter fließendem Wasser gereinigt und mit einer Kunststoffbürste von Erdresten und anderen Verunreinigungen befreit. Anschließend wurden die Proben im Ultraschallbad gereinigt.

3.2.5 Industrielle Reiniger- und Desinfektionslösungen ^(HTWG)

Bei diesen Auslagerungsversuchen wurden die Proben der verschiedenen Werkstoffe mit den Oberflächen W (Walzoberfläche gebeizt + passiviert), TS (Trockenschliff), GP (Glasperlen gestrahlt) und EP (Elektropoliert) und in Reinigungsmitteln, wie diese in der lebensmittelverarbeitenden Industrie Verwendung finden, ausgelagert. Es handelt sich um die folgenden Reiniger der Firma Johnson Diversey:

Tab 7: Typisierung der Prüfmedien gemäß Sicherheitsdatenblätter 2001/58/EC

Name	Acigel VG7	Supergel VG3	TEGO 2000
Typ	saurer Schaum- und Gelreiniger	alkalische Schaum- & Gelreiniger	Desinfektionsmittel
Verwendung	Reinigung Werterhaltung	Reinigung Werterhaltung	Desinfektion für professionelle Anwendungen
Gefährliche Inhaltstoffe	Phosphorsäure ≥30 % Aminoxid <5 % Salpetersäure <5 % Ethylidiglycol <5 % Butylidiglykol <5 % Aminoxid <5 % Alkylalkoholethoxylat <5 %	Isopropanol 5-15% Natriumhydroxid <5 % Tetranatriummethylen- diamintetraacetat <5 % Aminoxid (CAS61791-46-6) <5 % Aminoxid (CAS3332-27-2) <5 %	Reaktionsprodukt Alkylaminoessigsäure mit Alkyldiazapentan 15-30%
Inhaltsstoffe gemäß 648/2004	Phosphate ≥30 % Nichtionische Tenside 5-15 %	Seife, EDTA und ihre Salze, nichtionische Tenside <5 %	
pH-Wert	≤ 2	>12,5	7,5 < x ≤ 8,0

Für die Auslagerungen wurden Probenpakete zusammengefasst. Dabei wurde je Prüflösung und Werkstoff ein Becherglas mit den Proben aus einem Werkstoff mit den vier verschiedenen Oberflächencharakteristika bestückt. Die Proben wurden im Becherglas stehend und an die Becherwand angelehnt ausgelagert. Somit wurden für die drei Reiniger jeweils neun Bechergläser mit den Proben eines Werkstoffs in den vier unterschiedlichen Oberflächen ausgelagert. Die Abb. 15 zeigt die Bestückung der Bechergläser für die Auslagerung.

Die Proben wurden im Tauchtest so ausgelagert, dass die Probenbleche bis zur Hälfte von der Prüflösung bedeckt wurden. Die andere Hälfte war der Gasphase ausgesetzt. Auf diese Weise entstehen am Probenkörper drei unterschiedliche Zustände, die Flüssigphase, die

Gas- bzw. Dampfphase und die Übergangszone von flüssig zu gasförmig, welche auch als Dreiphasengrenze bezeichnet wird.

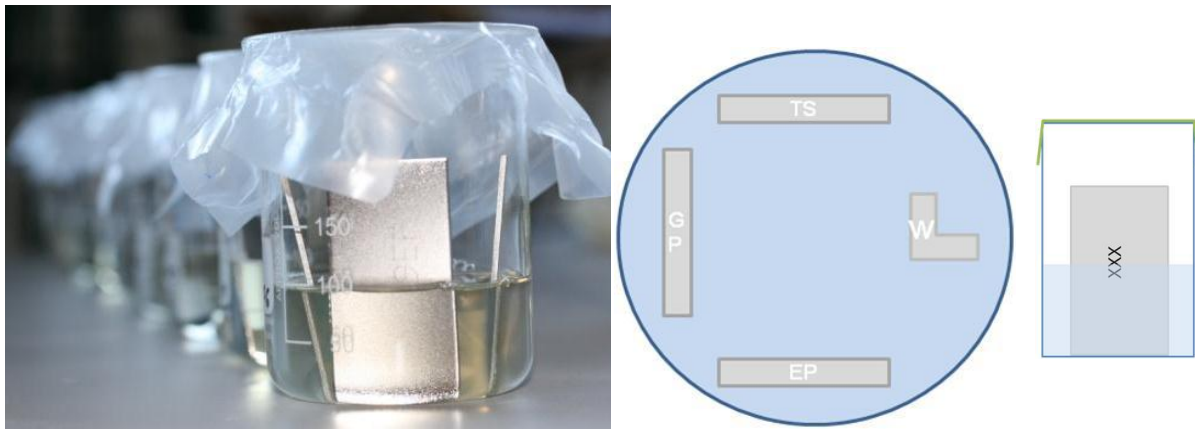


Abb. 15: Bestückung der Bechergläser

Die Prüflösungen wurden in den Laborversuchen in erhöhter Konzentration eingesetzt, als dies in der Praxis üblich ist. Jeder Reiniger wurde im Verhältnis 1:1 mit deionisiertem bzw. destilliertem Wasser gemischt. Die Mischung wurde mit Hilfe eines Magnetrührers hergestellt, um eine homogene Mischung zu erhalten. Jedes Becherglas wurden mit ~100 ml Prüfmedium gefüllt und anschließend mit den Proben bestückt. Um eine konstante Wirkstoffkonzentration in der Flüssig- und Dampfphase über die Auslagerungszeit aufrecht zu erhalten, wurden die Bechergläser mit Nescofilm-Folie abgedeckt. Diese haftet am Glas an und verhindert somit das Abdampfen von Wirkstoffen und Flüssigkeiten. Die Proben wurden vor der Auslagerung im Ultraschallbad gereinigt und mit Ethanol entfettet. Zur Kennzeichnung waren die Proben mit einer Markierung versehen. Über die Auslagerungszeit wurden die Proben in regelmäßigen Intervallen optisch begutachtet. Veränderungen an der Oberfläche wurden dokumentiert. Die Auslagerungen in den diversen Reinigungsmitteln wurden unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt und über unterschiedlich lange Zeiträume erfasst. Die Auslagerungsbedingungen sind in der nachfolgenden Tab. 8 zusammengefasst dargestellt.

Tab. 8: Auslagerungsbedingungen der Auslagerung in Reinigungslösung

Name	Acigel VG7	Supergel VG3	TEGO 2000
Auslagerungs-Temperatur	Raumtemperatur ~20°C	konstant 48°C	konstant 48°C
Auslagerungs-ort	Laborarbeitsplatz WITg	Wärmeschrank	Wärmeschrank
Zeitraum	48 Tage	50 Tage	75 Tage

3.2.6 Natriumhypochlorid ^(HTWG)

Bei diesem Auslagerungsversuch werden die Proben der verschiedenen Werkstoffe mit den Oberflächen W (Walzoberfläche gebeizt + passiviert), TS (Trockenschliff), GP (Glasperlen gestrahlt) und EP (Elektropoliert) in einer 5%igen Natriumhypochlorit-Lösung ausgelagert.

Für die Auslagerungen wurden Probenpakete zusammengefasst. Dabei wurde je Prüflösung und Werkstoff ein Becherglas mit den Proben in den verschiedenen Oberflächenzuständen bestückt. Die Proben wurden im Becherglas stehend, an die Becherwand angelehnt ausgelagert. Die Abbildung 16 zeigt die Bestückung der Bechergläser für die Auslagerung.

Die Proben wurden im Halbtauchtest ausgelagert was bedeutet, dass die Probenstücke bis zur Hälfte in die Natriumhypochlorit-Prüflösung eingetaucht waren. Die andere Hälfte war der atmosphärischen Gasphase ausgesetzt. Auf diese Weise entstehen am Probenkörper drei unterschiedliche Zustände, die Flüssigphase, die Gas- bzw. Dampfphase und die Übergangszone von flüssig zu gasförmig, welche auch als Dreiphasengrenze bezeichnet wird.

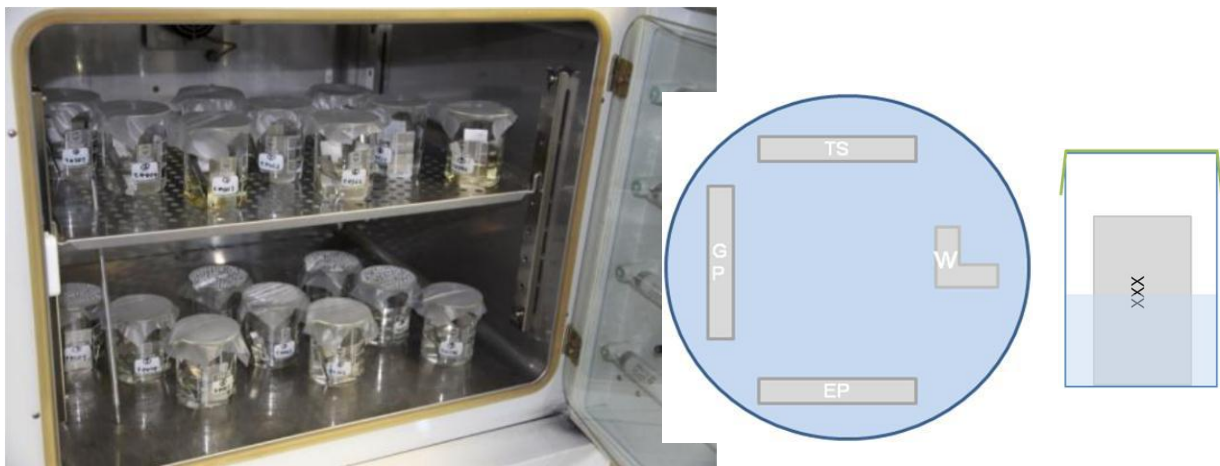


Abb. 16: Natriumhypochlorid Auslagerung im Klimaschrank

Die Prüflösung NaClO wurde aus destilliertem H₂O und ursprünglicher 12% NaClO in H₂O der Firma Carl Roth GmbH & Co.KG (Art.-Nr. 9062.3) hergestellt.

Jedes Becherglas wurde mit ~100 ml Natriumhypochlorit-Lösung gefüllt und anschließend mit den Proben bestückt. Um eine konstante Wirkstoffkonzentration in der Flüssig- und Dampfphase über die Auslagerungszeit aufrecht zu erhalten, wurden die Bechergläser mit Nescofilm-Folie abgedeckt. Diese haftet am Glas an und verhindert somit das Abdampfen von Wirkstoffen.

Die Proben wurden vor der Auslagerung im Ultraschallbad gereinigt und mit Ethanol entfettet. Ansonsten verblieben die Proben im Anlieferzustand und wurden in keiner Weise behandelt oder bearbeitet. Zur Kennzeichnung waren die Proben mit einer Markierung versehen.

Über die Auslagerungszeit wurden die Proben in regelmäßigen Intervallen optisch begutachtet. Veränderungen an der Oberfläche wurden dokumentiert.

Die Auslagerung wurde unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt. Die Versuchsreihe 1 wurde bei Raumtemperatur bei $\sim 20^\circ\text{C}$ durchgeführt. Die identische Versuchsreihe 2 wurde im Wärmeschrank bei konstant gehaltenen 48°C durchgeführt.

3.3 Elektrochemische Untersuchungen

Bei den elektrochemischen Untersuchungen kamen die in Abbildung 17 schematisch dargestellten Proben zum Einsatz. Die Proben in Oberflächenausführung „W“ sind sowohl mit, als auch ohne Abkantung geprüft worden, um diesen Einflussfaktor diskret untersuchen zu können. Zur elektrischen Kontaktierung ist an die jeweilige Probe ein Schweißdraht an gepunktet worden (vgl. 3.2.1). Die Schnittkanten wurden zweistufig in Körnung 220 und 500 geschliffen.

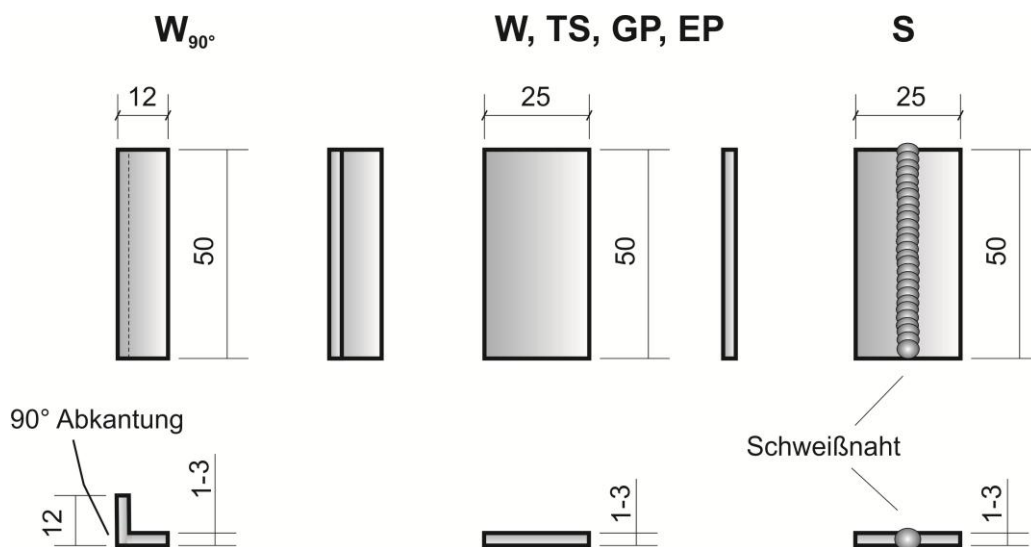


Abb. 17: Probenformen und -abmessungen für elektrochemische Untersuchungen, Maße in mm

Für die elektrochemischen Versuche wurden gesättigte Silber-Silberchloridelektroden (Ag/AgCl) der Fa. Meinsberg in verschiedenen Ausführungen verwendet. Diese Elektroden haben ein Potential von $+199\text{ mV}$ gegen die Standardwasserstoffelektrode (SHE). Alle Potentialangaben in den Ergebnisdarstellungen beziehen sich, wenn nicht explizit anders angegeben, auf die Ag/AgCl-Bezugselektrode.

Die Prüflösung hatte für alle elektrochemischen Versuche einen pH-Wert 4,5 (bei RT $23^\circ\text{C} \pm 2\text{ K}$) mit einen Zusatz von $3000\text{ mg Cl}^-/\text{l}$ (aus NaCl).

Als elektrochemische Kennwerte wurden das kritische Lochkorrosionspotential E_{krit} , das Repassivierungspotential E_{Rep} in potentiodynamischen Polarisationsmessungen und das Spaltkorrosionspotential E_{Spalt} in potentiostatischen Stufenversuchen erfasst. Die Parameter und Versuchsdurchführungen werden im Folgenden beschrieben.

3.3.1 Potentiodynamische Polarisationsmessungen ^(BAM)

Für die potentiodynamischen Untersuchungen kamen ein Mehrfachmessplatz mit vier temperierbaren Messzellen der Fa. Meinsberg und ein Potentiostatensystem der Fa. GAMRY zum Einsatz. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 18 dargestellt.

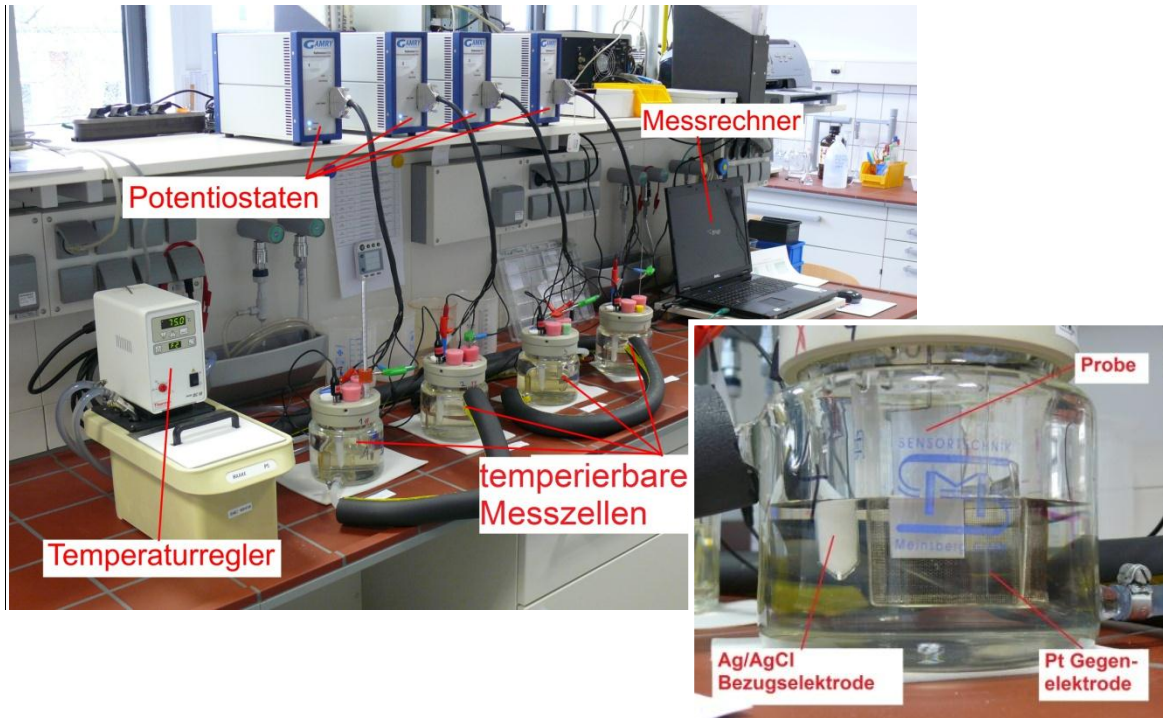


Abb. 18: Versuchsaufbau für die potentiodynamischen Polarisationsmessungen

Die jeweiligen Proben wurden für die Versuche ca. 20 mm tief in die Versuchslösung eingetaucht (Abb. 18), die effektive Messfläche betrug somit ca. 10 cm².

Der Potentialvorschub dE/dt bei den potentiodynamischen Polarisationsmessungen betrug 0,2 mV/s ausgehend vom Freien Korrosionspotential E_{cor} in anodische Richtung. Als Auswertekriterium für die Ermittlung der kritischen Lochkorrosionspotentiale E_{krit} bzw. der Repassivierungspotentiale E_{Rep} wurde die dauerhafte Über- bzw. Unterschreitung eines Stromdichtewertes von 0,01 mA/cm² herangezogen.

Die Untersuchungen erfolgten für alle Probenvarianten standardmäßig bei einer Temperatur von 20 °C. Der Temperatureinfluss auf die elektrochemischen Kennwerte wurde ausschließlich an Oberflächenausführung W untersucht. Die Temperatur der Prüflösung wurde dabei in den Abstufungen 20, 30, 40, 50 und 70 °C jeweils konstant eingestellt. Die Proben wurden im Vorfeld der Messung bis zur Anpassung an die jeweilige Prüftemperatur in die Prüflösung eingetaucht.

3.3.2 Spaltkorrosionsversuche ^(BAM)

Zur Ermittlung der Spaltkorrosionspotentiale E_{Spalt} wurden potentiostatische Stufenversuche mit einem Potentiostatensystem der Fa. GAMRY durchgeführt. Der Start für alle Versuche lag bei einem Potentialwert von $+100 \text{ mV}_{Ag/AgCl}$. Für die nächsten Potentialstufen wurde jeweils nach 120 Minuten Haltezeit das Potential um 50 mV erhöht und somit in anodische Richtung verschoben. Die Ladungsmenge Q wurde über die Stufen aufsummiert und der Versuch beim Erreichen von $Q=500 \text{ mC}$ potentiodynamisch in kathodische Richtung bis zu einem Potentialwert von $-200 \text{ mV}_{Ag/AgCl}$ zurückgefahren. Der Potentialvorschub dE/dt betrug dabei 0,5 mV/s.

Es kam hierbei von allen Werkstoffen die Oberflächenausführung W zum Einsatz. Die Spaltgeometrie wurde durch eine Aufsatzmesszelle realisiert, die auf die Proben aufgeklebt worden ist (Abb. 19). Die Prüftemperatur betrug für die Versuche $20 \text{ }^\circ\text{C}$.



Abb. 19: Proben Setup für die Spaltkorrosionsversuche

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der Auslagerung in natürlichen Klimaten

4.1.1 Stadtatmosphäre ^(BAM)

Die Probenzustände nach Auslagerung an Stadtatmosphäre sind in Abbildung 20 exemplarisch für Oberflächenausführung „W“ dargestellt. Es sind auf allen Proben leichte und für Freibewitterungsversuche gewöhnliche Verunreinigungen (Staub, organische Partikel) auf den Probenoberflächen vorhanden. Bis auf den Werkstoff 3 (1.4003), der schon nach kurzer Zeit Korrosionserscheinungen zeigte, blieben die übrigen Werkstoffe in einem korrosionsfreien Oberflächenzustand.



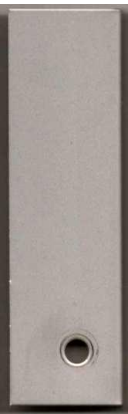















	Austenit			Duplex			Ferrit		
	1W 1.4301	2W 1.4404	9W 1.4376	4W 1.4162	5W 1.4062	6W 1.4362	7W 1.4509	8W 1.4521	3W 1.4003
Auslagerungszeit 12 Monate									
Auslagerungszeit 24 Monate									

Abb. 20: Proben im Oberflächenausführung „W“ nach Auslagerung an **Stadtatmosphäre**

Die Auswertung der Bedeckungsgrade der Probenoberflächen und die Einordnung in Bewertungsgrade nach den Auslagerungsversuchen an Stadtatmosphären ist in Abbildung 21 dargestellt. Die unterschiedlichen Oberflächenausführungen zeigen nach 24-monatiger Auslagerungszeit überwiegend vergleichbare Ergebnisse mit Bewertungsgraden zwischen 8

und 9,5. Lediglich beim Werkstoff 3 (1.4003) konnte, ausgehend von einem Bewertungsgrad 3 der Originaloberfläche, durch eine elektropolierte Oberflächenausführung „EP“ mit 6,5 ein geringfügig besseres Ergebnis erzielt werden.

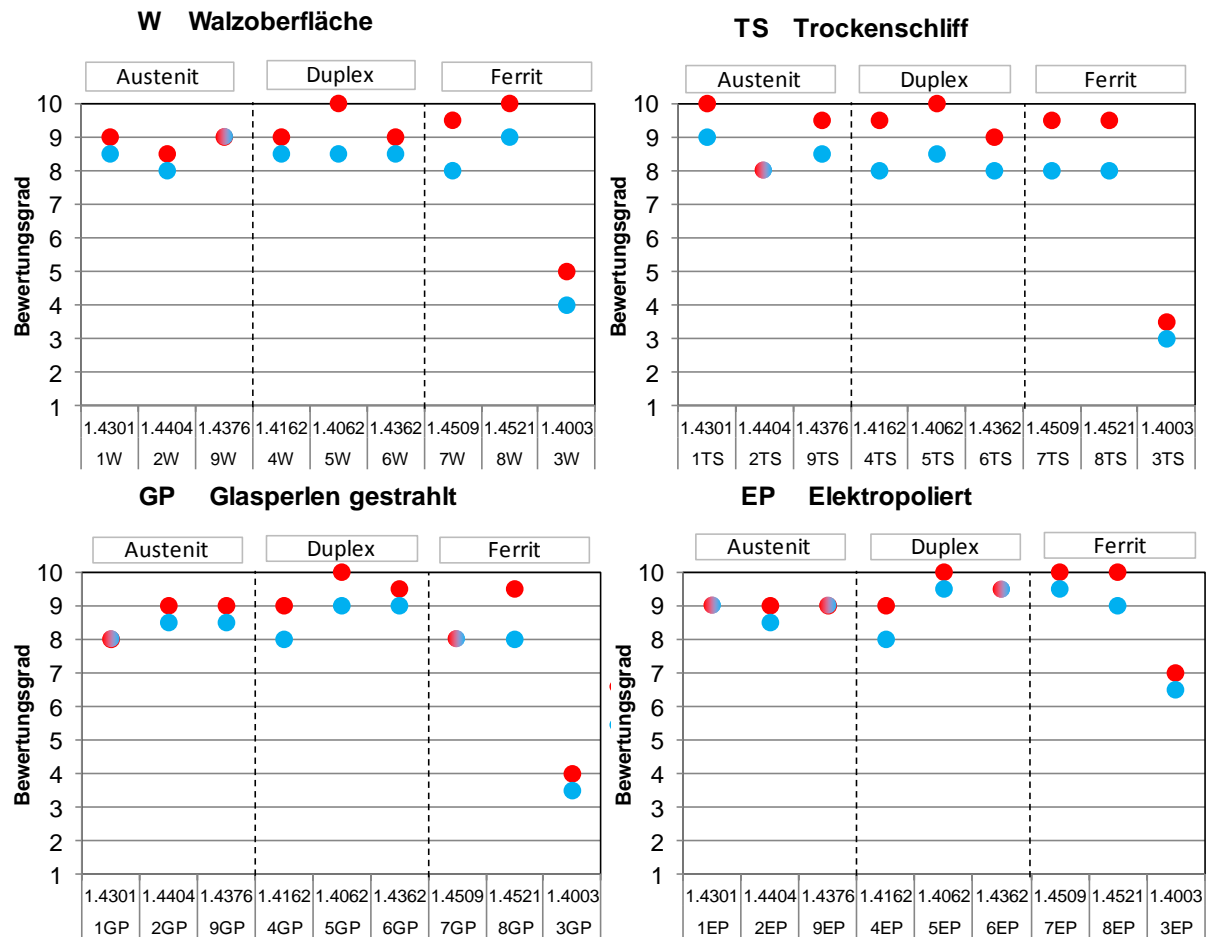


Abb. 21: Bewertungsgrade der Proben mit unterschiedlichen Oberflächenausführungen nach Auslagerung an **Stadtatmosphäre**; ● 12 Monate ● 24 Monate

Die verbindungsgeschweißten Proben „S“ zeigten im Bereich der Schweißnaht und der Wärmeeinflusszone zum Ausgangszustand kein abweichendes Korrosionsverhalten (Abb. 22). Die Bewertungsgrade lagen nach 24-monatiger Auslagerungszeit überwiegend zwischen 8 und 9. Ausnahme bildete auch hier der Werkstoff 3 (1.4003) mit Bewertung 3,5.

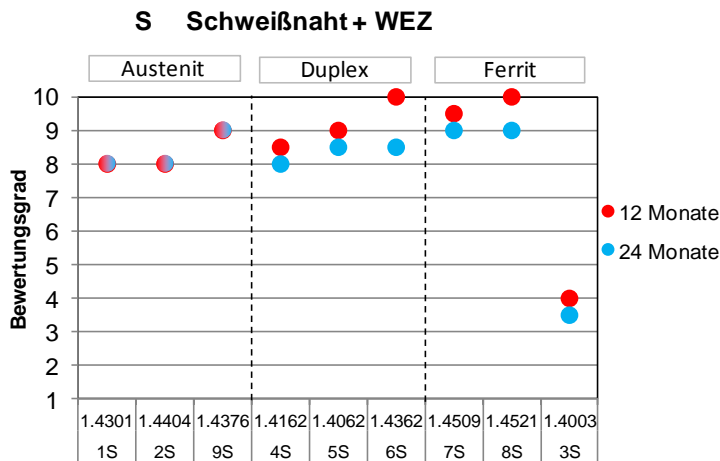


Abb. 22: Bewertungsgrade der Verbindungsgeschweißten Proben nach Auslagerung an **Stadtatmosphäre**

Ein Einfluss der Kaltumformung auf das Korrosionsverhalten im Bereich der Abkantung (Oberflächenausführung *W*) konnte bei keinem Werkstoff festgestellt werden. Auch ein Einfluss der Auslagerungszeit war nicht vorhanden, die Änderungen belaufen sich maximal auf 1,5 Bewertungsgrade.

Lochtiefen konnten bei der Auslagerung an Stadtatmosphäre nur am ferritischen Werkstoff 3 (1.4003) bestimmt werden (Abb. 23) und betragen im Mittel zwischen 10 und 20 µm mit recht hohen Streuungen. Alle anderen Werkstoffe blieben nach der 24-monatigen Auslagerungsdauer praktisch korrosionsfrei.

Spaltkorrosionserscheinungen im Befestigungsbereich wurde ebenfalls nur am Werkstoff 3 (1.4003) festgestellt. Die maximalen Lochtiefen beliefen sich hier auf 25 µm für den Metall/Kunststoffspalt auf der Probenrückseite und auf 10 µm für den Metall/Metallspalt auf der Probenvorderseite.

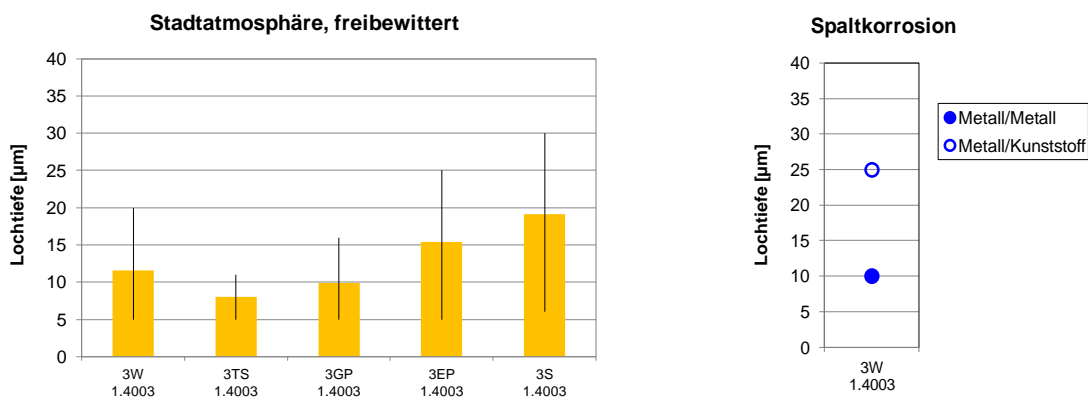


Abb. 23: Lochtiefen am Werkstoff 1.4003 nach 24 monatiger Auslagerung an **Stadtatmosphäre**; freie Oberfläche (links), Streubänder aus 10 Einzelmessungen; Spaltbereich (rechts), maximale Lochtiefe

4.1.2 Meeresatmosphäre ^(BAM)

4.1.2.1 Freibewitterte Auslagerung

Die Probenzustände der freibewitterten Auslagerungsversuche sind exemplarisch an Oberflächenausführung *W* in Abbildung 24 dargestellt. Auf den Probenoberflächen konnten organische Ablagerungen sowie geringfügige Salzablagerungen festgestellt werden, wie sie für Naturversuche üblich sind. Durch die im Vergleich zur Stadtatmosphäre stärkere Korrosionsbelastung an Meeresatmosphäre sind die Oberflächen hier erwartungsgemäß bei allen Werkstoffen stärker korrodiert und das optische Erscheinungsbild bereits nach 12-monatiger Auslagerung deutlich beeinflusst.




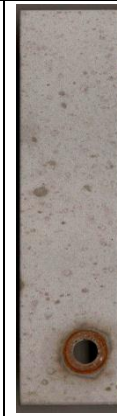
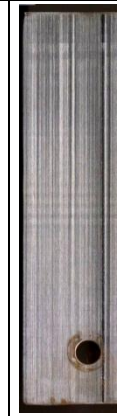



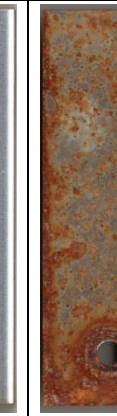




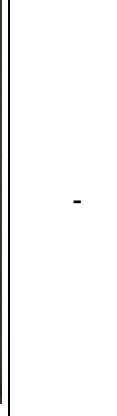



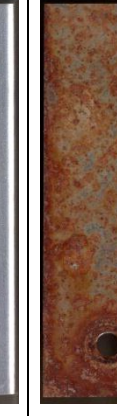
	Austenit			Duplex			Ferrit		
	1W	2W	9W	4W	5W	6W	7W	8W	3W
	1.4301	1.4404	1.4376	1.4162	1.4062	1.4362	1.4509	1.4521	1.4003
Auslagerungszeit 12 Monate									
Auslagerungszeit 22 Monate									

Abb. 24: Probenzustände in Oberflächenausführung „W“ nach **freibewitterter** Auslagerung in **Meeresatmosphäre**

Ein signifikanter Einfluss der Auslagerungsdauer konnte allgemein nicht festgestellt werden, die Unterschiede zwischen den zwei Bewertungszeitpunkten sind nur marginal. Ein akzeptables optisches Erscheinungsbild zeigten bei Oberflächenausführung *W* nur der molybdänlegierte ferritische Werkstoff 8 (1.4521) sowie der Duplex Werkstoff 5 (1.4062). Der molybdänlegierte Standardaustenit und Referenzwerkstoff 1.4404 zeigt hingegen ein unerwartet schlechtes Korrosionsverhalten an dieser Exposition, welches vergleichbar mit den molybdänfreien Werkstoffen 1.4301 und 1.4509 ist. Der ferritische Werkstoff 3 (1.4003) ist

bei dieser Korrosionsbelastung nicht beständig und zeigte im Vergleich der Werkstoffe die stärkste Lochkorrosion die z.T. schon in eine flächige Korrosion überging.

Der Einfluss der Oberflächenausführung ist anhand von Bewertungsgraden hinsichtlich der Bedeckung der Oberflächen mit Korrosion und Korrosionsprodukten in Abbildung 25 dargestellt. Durch die Oberflächenausführung Trockenschliff *TS* konnten die Bewertungsgrade bei den austenitischen und Duplex Werkstoffen im Vergleich zur Originaloberfläche z.T. deutlich verbessert werden, hier zeigen besonders die Duplexvarianten mit Bewertungsgraden 8-10 optisch akzeptable Oberflächenzustände. Auch bei den elektropolierten Oberflächen *EP* konnten allgemein verbesserte Bewertungsgrade festgestellt werden. Eine Oberflächenbearbeitung durch Glasperlenstrahlen *GP* brachte hingegen keinen signifikant positiven Effekt bzgl. des Korrosionsverhaltens.

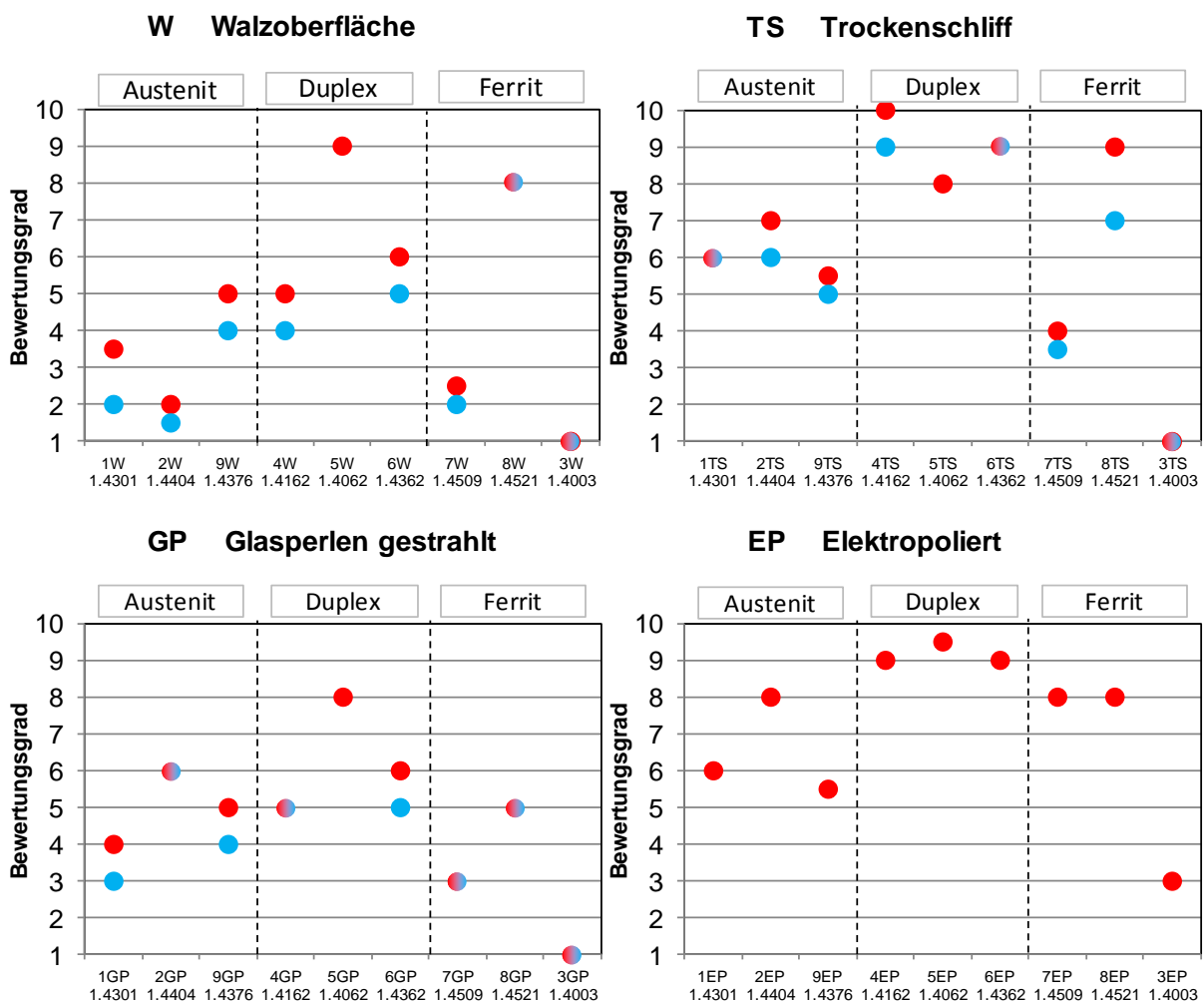


Abb. 25: Bewertungsgrade von Proben mit unterschiedlichen Oberflächenausführungen nach **freibewitterter** Auslagerung an **Meeresatmosphäre**; ● 12 Monate ● 22 Monate

Die Lochtiefen nach 22-monatiger Auslagerungszeit sind in Abbildung 26 dargestellt. Bei Oberflächenausführung *W* wiesen die Duplexvarianten in Oberflächenausführung *W* trotz einer optischen Beeinträchtigung nur einen sehr oberflächigen ($<2 \mu\text{m}$) Korrosionsangriff auf. Bei den Oberflächenausführungen *TS* und *GP* waren bei den Duplexwerkstoffen dann zwar

Lochkorrosionserscheinungen mit mittleren Tiefen zwischen 7 und 10 μm feststellbar, aber nur in geringer Anzahl im Vergleich zu den anderen Werkstoffen.

Bei der elektropolierten Oberflächenausführung waren Lochkorrosionserscheinungen bei den austenitischen Werkstoffen 1.4301 und 1.4376 sowie bei den ferritischen Werkstoffen 1.4509 und 1.4003 in geringer Anzahl vorhanden.

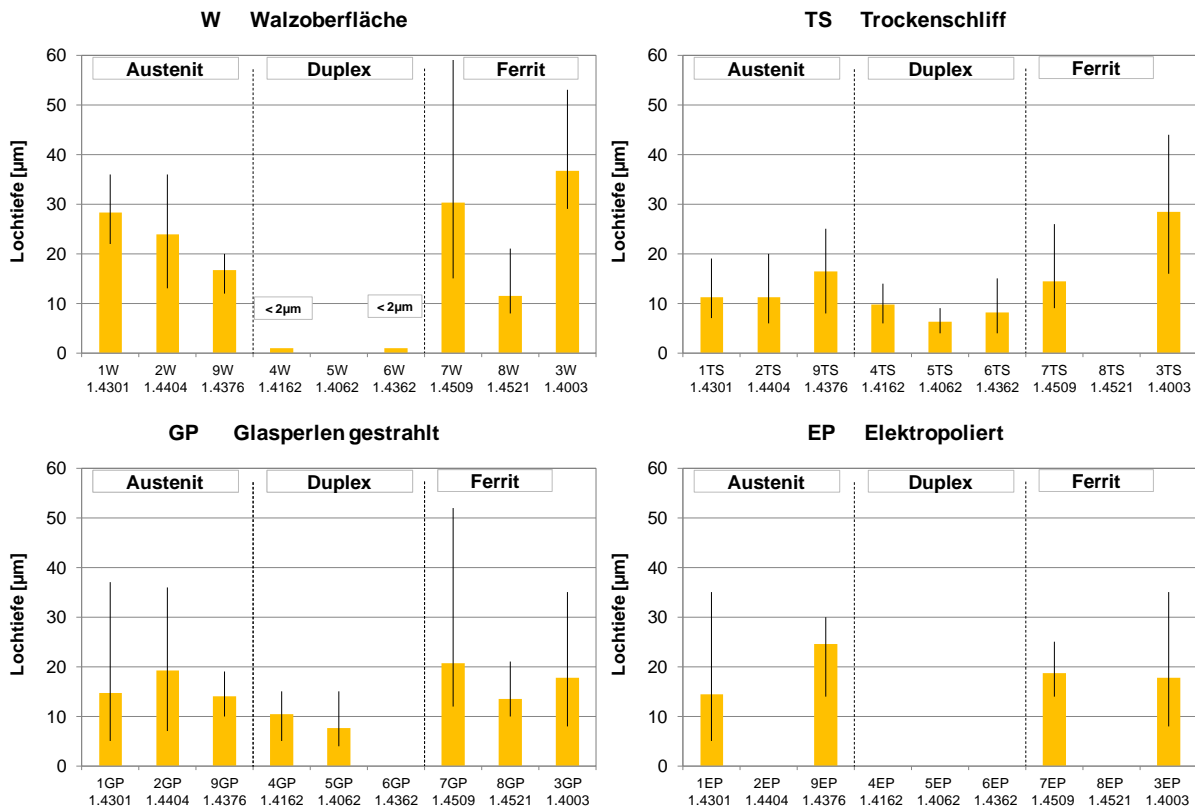


Abb. 26: Lochtiefen von Proben unterschiedlicher Oberflächenausführungen nach 22-monatiger **freibewitterter** Auslagerung an **Meeresatmosphäre**

Die Schweißnähte und Wärmeeinflusszonen (WEZ) der verbindungsgeschweißten Proben zeigten nur bei den Werkstoffen 5 (1.4062) und 8 (1.4521) ein zur Originaloberfläche abweichendes Korrosionsverhalten (Abb. 27). Die Oberflächen zeigen in diesen Bereichen zwar flächige Verfärbungen, die zu Bewertungsgraden von 4 bzw. 3 führten, messbare Lochtiefen konnten jedoch an beiden Werkstoffen nicht festgestellt werden. Lochtiefen konnten hier nur bei den zwei Standardausteniten 1.4301 und 1.4404 sowie bei zwei ferritischen Werkstoffen 1.4509 und 1.4003 festgestellt werden, wobei die tiefsten Löcher mit 120 μm beim Werkstoff 3 (1.4003) vorhanden waren.

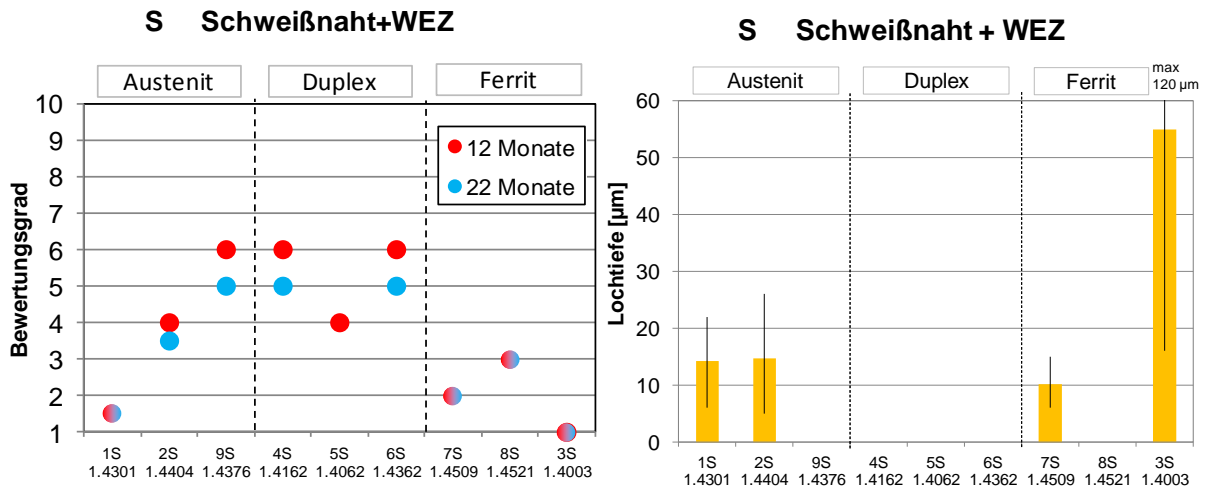


Abb. 27: Bewertungsgrade (links) und Lochtiefen (rechts) der verbindungsgeschweißten Proben nach freibewitterter Auslagerung an Meeresatmosphäre

Die ermittelten Lochtiefen der unterschiedlichen Spalttypen Metall/Metall und Metall/Kunststoff sind in Abbildung 27 dargestellt und liegen für alle Werkstoffe und z.T. sehr deutlich über denen der vergleichbaren spaltfreien Walzoberflächen. Ein genereller Einfluss des Spalttyps war nicht feststellbar. In Abbildung 28 sind die Metall/Metall Spalte im Bereich des Bohrloches zu erkennen. Der molybdänlegierte Ferrit 1.4521 zeigte visuell die geringsten Spaltkorrosionserscheinungen beim Metall/Metall Spalt, die Lochtiefe lag dennoch bei etwa 40 µm.

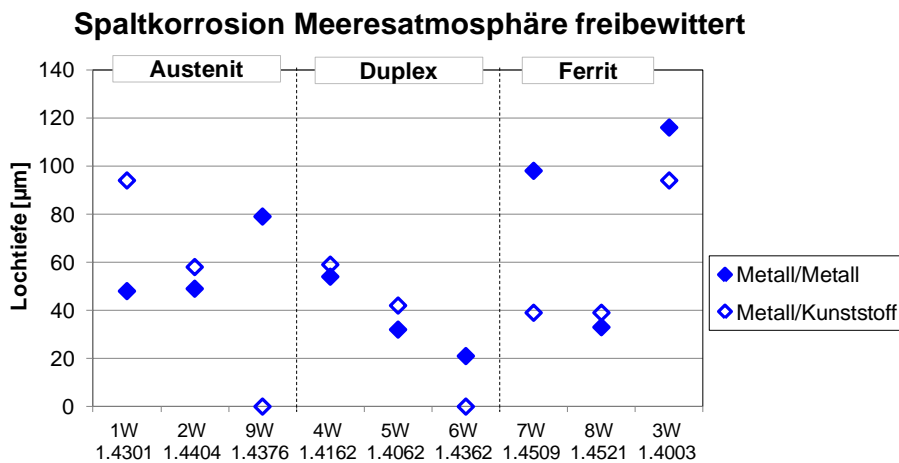


Abb. 28: Maximale Lochtiefen der unterschiedlichen Spalttypen an Oberflächenausführung W nach 22-monatiger freibewitterter Auslagerung an Meeresatmosphäre

4.1.2.2 Überdachte Auslagerung

Das Erscheinungsbild der Probeoberflächen aus den überdachten Auslagerungsversuchen an Meeresatmosphäre unterscheidet sich deutlich von den entsprechenden freibewitterten Proben (4.1.2.1). Die Probenzustände sind in Abbildung 29 exemplarisch für Oberflächenausführung *W* dargestellt. Die Korrosionserscheinungen waren weniger häufig, aber dafür stärker ausgeprägt. Es wurden zudem deutlich mehr Randeffekte und Aufkonzentrations-effekte an den unteren Kanten festgestellt. Der kaltumgeformte Bereich der Abkantung bei Oberflächenausführung *W* blieb hinsichtlich des Korrosionsverhaltens unauffällig.

	Austenit			Duplex			Ferrit		
	1W	2W	9W	4W	5W	6W	7W	8W	3W
	1.4301	1.4404	1.4376	1.4162	1.4062	1.4362	1.4509	1.4521	1.4003
Auslagerungszeit 12 Monate									
Auslagerungszeit 22 Monate					-				

Abb. 29: Probenzustände in Oberflächenausführung „W“ nach **überdachter** Auslagerung an **Meeresatmosphäre**

Nur die drei Duplexvarianten 4, 5, 6 zeigten bei diesen Auslagerungsbedingungen akzeptable Oberflächenzustände, was sich auch in den Bewertungsgraden der Oberflächen wieder spiegelt (Abb. 30), hier wurden für diese Werkstoffe generell die besten optischen Ergebnisse ermittelt.

Ein Einfluss der Auslagerungszeit war beim Standardaustenit 1.4301 sowie bei den ferritischen Werkstoffen besonders bei der Oberflächenausführung *W* feststellbar. Der optische Zustand verschlechterte sich hierbei um bis zu 4 Bewertungsgrade. Beim Ferrit 1.4521, der

nach 12-monatiger Auslagerung noch eine gänzlich korrosionsfreie Oberfläche mit Bewertungsgrad 10 aufwies, wurde nach 22 Monaten ein Bewertungsgrad 6 dokumentiert.

Auch durch eine Oberflächenbearbeitung *TS* und *GP* der austenitischen und ferritischen Proben konnten keine signifikant besseren optischen Oberflächenzustände erreicht werden. Bei der elektropolierten Oberflächenausführung *EP* hingegen konnten besonders die austenitischen Werkstoffe nach 12-monatiger Auslagerung signifikant bessere optische Ergebnisse erzielen.

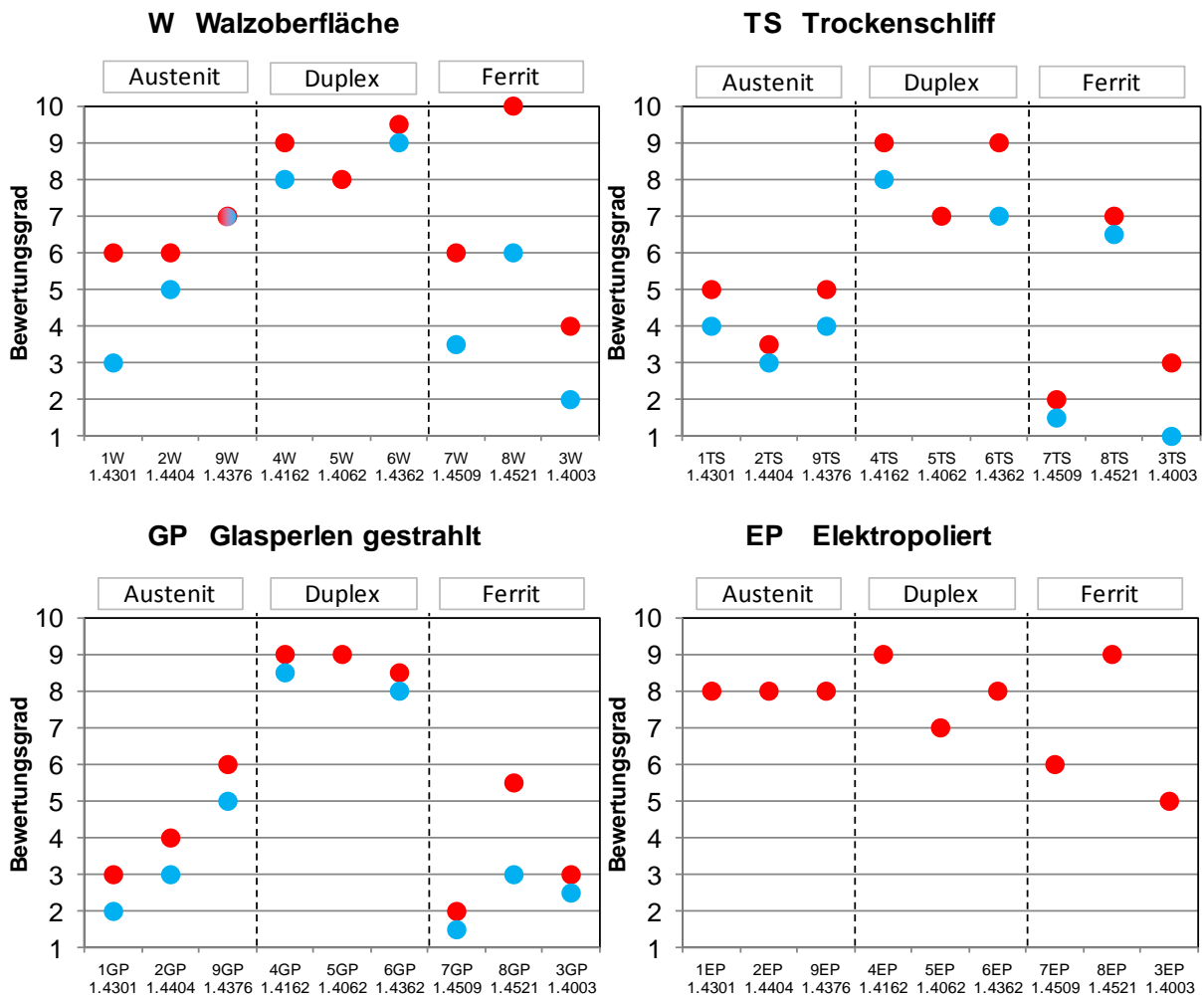


Abb. 30: Bewertungsgrade von Proben mit unterschiedlichen Oberflächenausführungen nach **überdachter** Auslagerung an **Meeresatmosphäre**; ● 12 Monate ● 22 Monate

Die Vorteile der Duplexstähle bei dieser Auslagerungsvariante werden auch bei den ermittelten Lochtiefen deutlich (Abb. 31). In Oberflächenausführung *W* waren keine, in *TS* und *GP* nur sehr wenige Löcher mit einer maximalen Tiefe von 50 µm feststellbar. Die mittleren Lochtiefen der austenitischen Werkstoffe lag für die Oberflächenausführungen *W*, *TS* und *GP* in vergleichbaren Größenordnungen zwischen 20 und 50 µm, die elektropolierte Variante *EP* zeigte keinen Lochkorrosionsangriff. In der elektropolierten Oberflächenausführung konnten nur bei den ferritischen Werkstoffen 1.4509 und 1.4003 Lochtiefen ermittelt werden.

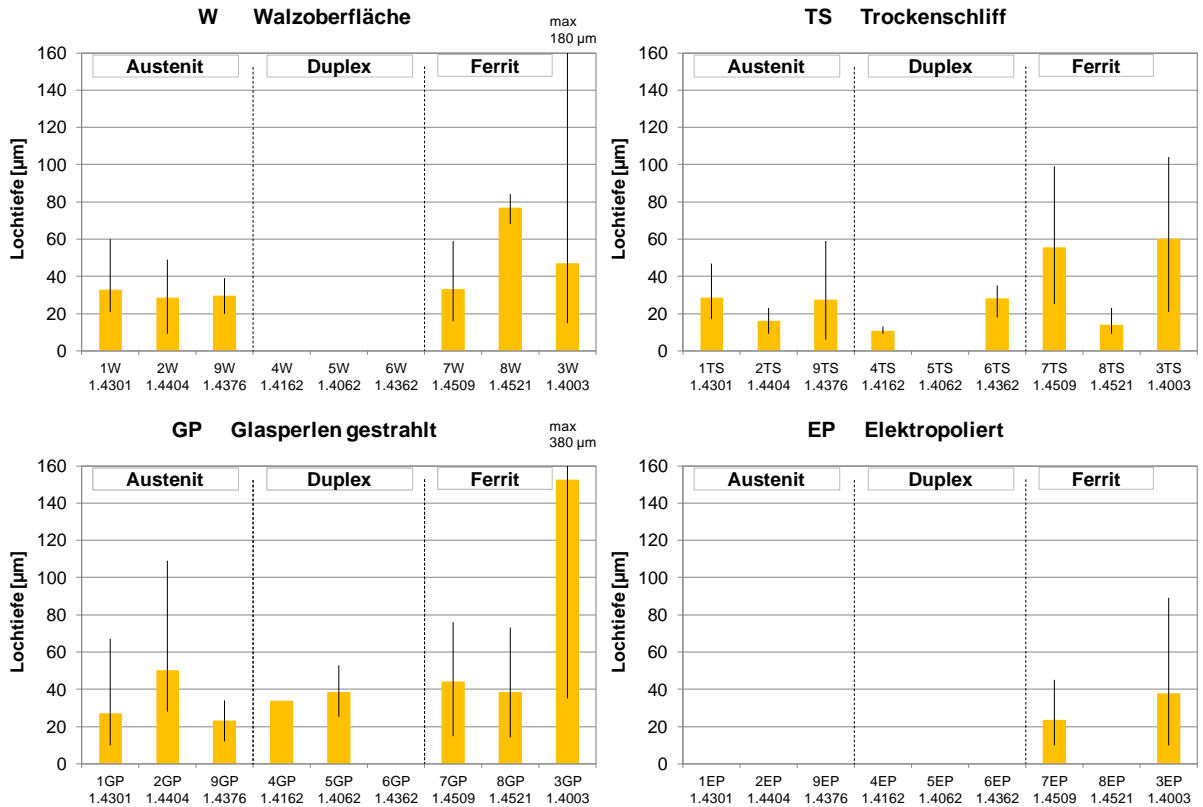


Abb. 31: Lochtiefen von Proben unterschiedlicher Oberflächenausführungen nach 22-monatiger überdachter Auslagerung an Meeresatmosphäre

Ein zur Originaloberfläche *W* signifikant abweichendes Korrosionsverhalten der verbindungsgeschweißten Proben im Bereich der Schweißnaht und der Wärmeeinflusszone konnte für die ferritischen Werkstoffe festgestellt werden (Abb. 32). Hier lagen die Bewertungsgrade nur zwischen 1 und 2. Die ermittelten Lochtiefen lagen für diese Ausführung bei maximal 110 µm und damit z.T. deutlich über denen der Originaloberflächen. Der Duplexwerkstoff 1.4062 wies nach 12-monatiger Auslagerung zwar einen relativ schlechten Bewertungsgrad von 5 auf, hatte jedoch nur eine Lochtiefe von 5 µm.

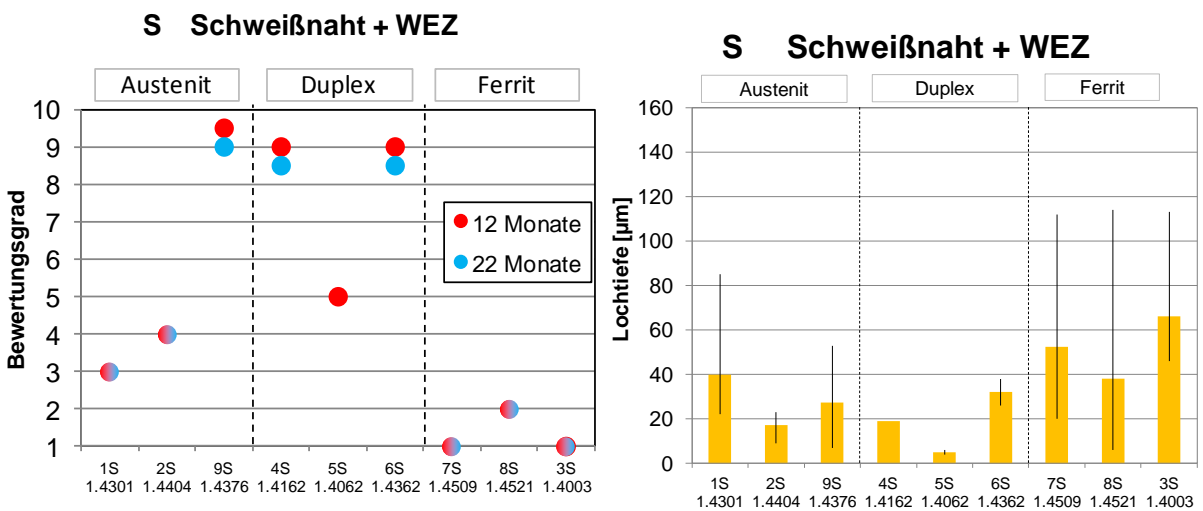


Abb. 32: Bewertungsgrade (links) und Lochtiefen (rechts) der verbindungsgeschweißten Proben nach überdachter Auslagerung an Meeresatmosphäre

Im Vergleich zu den spaltfreien Oberflächen in Ausführung *W* (vgl. Abb. 31) konnten im Spaltbereich z.T. signifikant tiefere Lochkorrosionserscheinungen vorgefunden werden (Abb. 33). Bei den Duplexvarianten war nur der Metall/Metallspalt mit Löchern behaftet, die Metall/Kunststoff Spalte blieben wie die spaltfreien Oberflächenbereiche praktisch korrosionsfrei. Ein genereller Einfluss des Spalttyps auf die Lochtiefen war nicht vorhanden.

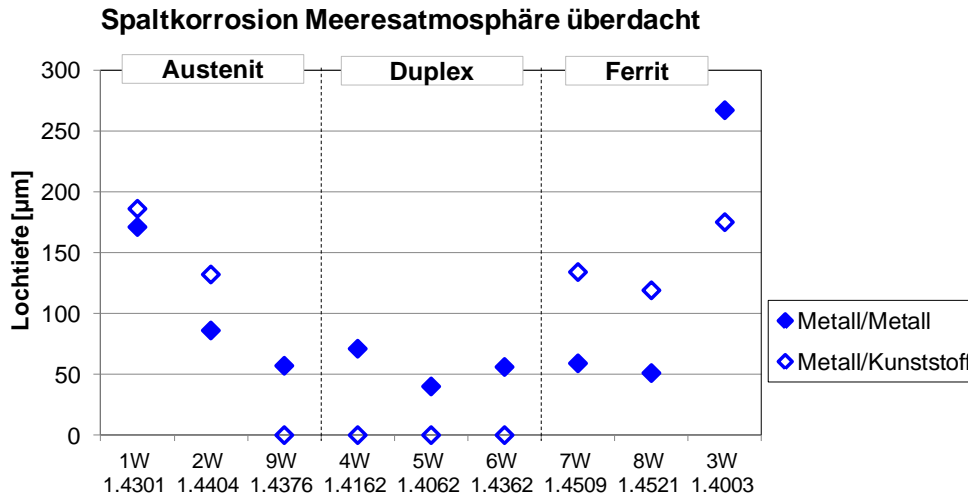


Abb. 33: Lochtiefen der unterschiedlichen Spalttypen an Oberflächenausführung *W* nach 22-monatiger **überdachter** Auslagerung an **Meeresatmosphäre**

4.1.3 Schwimmhalle ^(HTWG)

Die Auslagerung in Schwimmhallenatmosphäre erfolgte über 14 Monate von März 2010 bis Mai 2011. Die Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsaufzeichnung erfolgt über den Zeitraum vom 20.11.2010 bis zum 17.05.2011. In der Abb. 34 ist die Aufzeichnung der Klimadaten über diesen Zeitraum dargestellt.

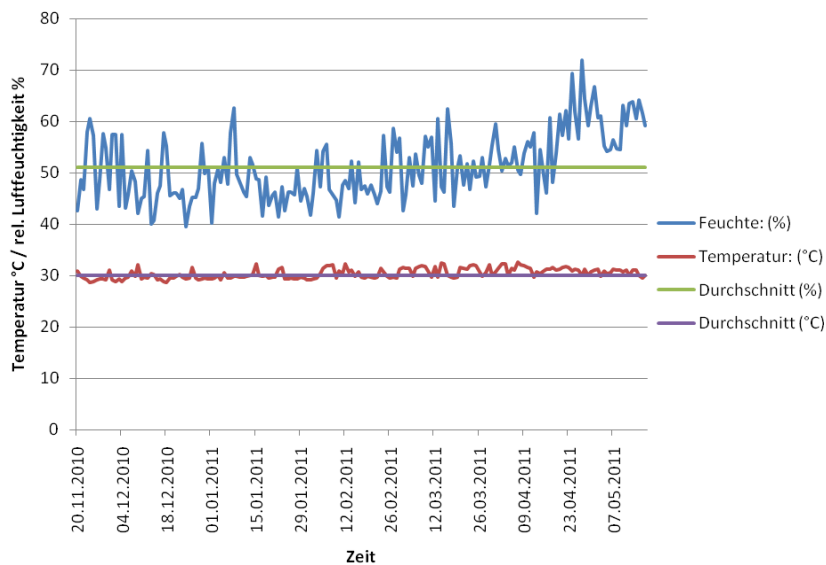


Abb. 34: Klimadokumentation während der Auslagerung im Schwimmbad „Bodenseetherme“

Es wird deutlich, dass die Lufttemperatur um den Mittelwert von 30°C schwankt. Der Höchstwert lag bei 32,6°, der Tiefstwert bei 28,6°C. Die Schwankungen in der Luftfeuchtigkeit sind deutlich ausgeprägter. Der Mittelwert liegt bei 51 % r. F. Als minimaler Wert wurde 36 % und als maximaler Wert 72 % registriert.

Nach Beendigung der Auslagerung wurde der Probenzustand zunächst ohne Reinigung erfasst. Beispielhaft sind in Abbildung 35 die Oberflächenzustände der Ausführungsart *GP* abgebildet. Es ist deutlich erkennbar, dass in dieser Oberflächenausführung sowohl die austenitischen Werkstoffe, als auch die Ferrite 1.4509 und 1.4003 unter den Auslagerungsbedingungen nicht beständig waren und starke Lochkorrosionserscheinungen aufwiesen. Die Duplexstähle hingegen zeigten ein gutes Korrosionsverhalten, hier waren nur im Bereich der Abtropfkanten stärkere Korrosionserscheinungen vorhanden.

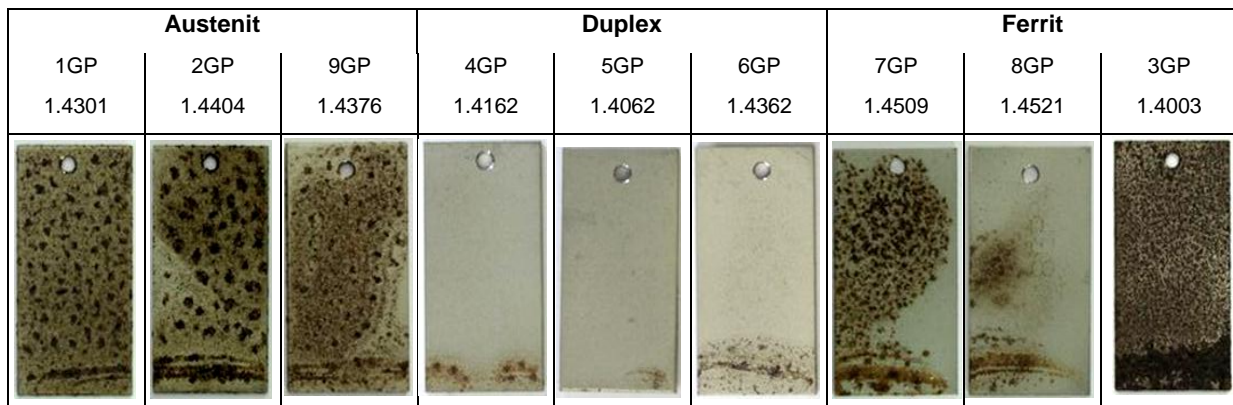


Abb. 35: Probenzustände in Oberflächenausführung *GP* nach 14-monatiger **Auslagerung in Schwimmhallenatmosphäre**

Der Einfluss der Oberflächenausführung auf die Bewertungsgrade ist in Abbildung 36 dargestellt. Hier wird deutlich, dass in der Oberflächenausführung *GP* bei allen Werkstoffen die stärksten Bedeckungsgrade mit Korrosionserscheinungen im Vergleich zu den anderen Ausführungsarten festgestellt werden konnten. Die Walzoberflächen *W* und die trockengeschliffenen Oberflächen *TS* erreichten vergleichbare Bewertungsgrade. An den trockengeschliffenen Proben *TS* konnte an den beiden austenitischen Referenzwerkstoffen 1.4301 und 1.4404 sowie dem Ferrit 1.4003 verstärkte Korrosion festgestellt werden. Die elektropolierten Oberflächen *EP* zeigten jeweils die besten Ergebnisse, hier wies nur der ferritische Werkstoff 1.4003 ausgeprägte Korrosionserscheinungen auf. Auch am Mangan-Austenit 1.4376 konnten leichte Korrosionserscheinungen festgestellt werden.

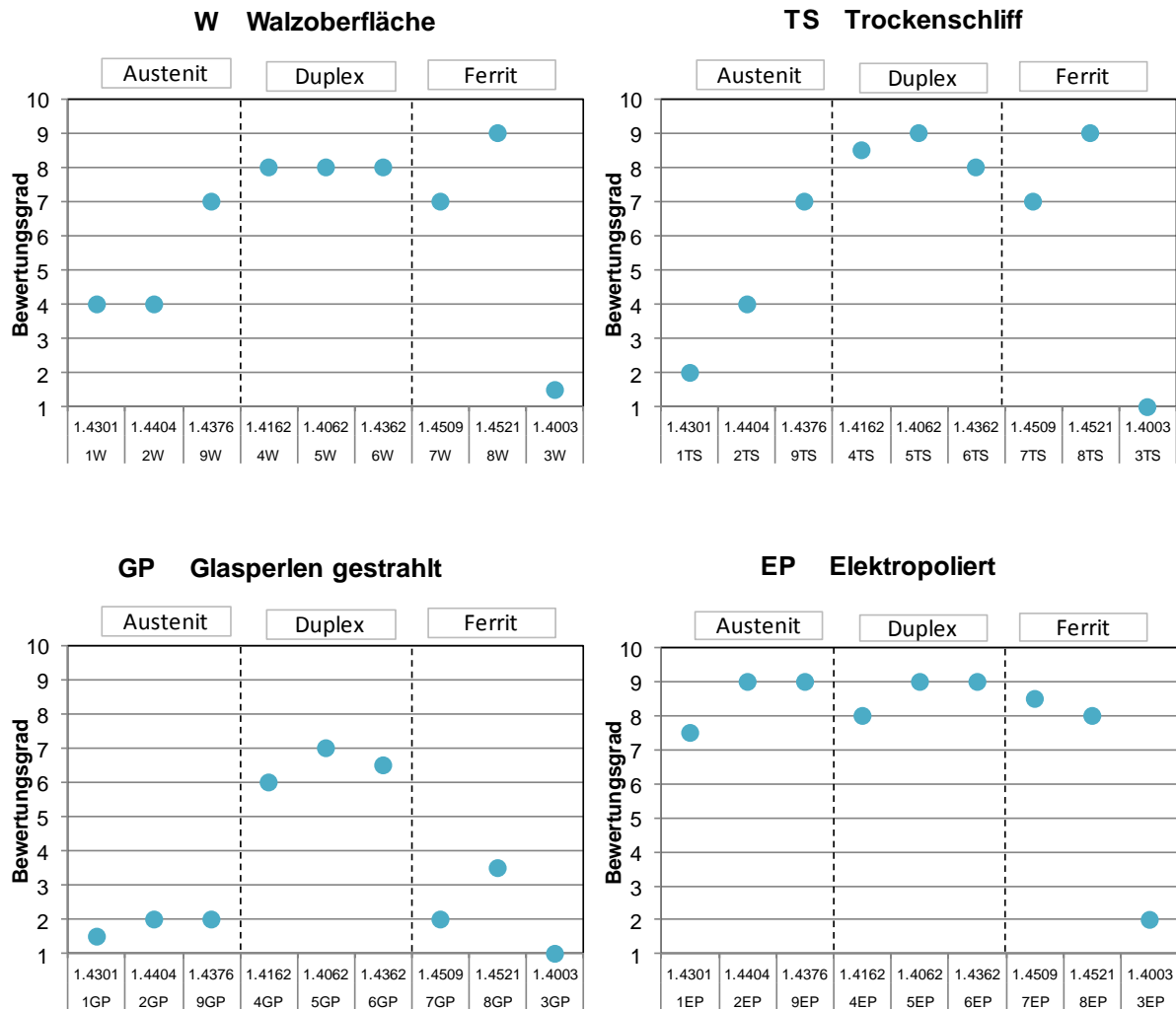


Abb. 36: Bewertungsgrade von Proben mit unterschiedlichen Oberflächenausführungen nach Auslagerung an **Schwimmballenatmosphäre**

Die Proben wurden nacheinander unter fließendem Wasser mit einer Kunststoffbürste und fünf Minuten im Ultraschallbad gereinigt. Anschließend konnte eine optische Bestimmung der Lochtiefen mit dem Videomikroskop Keyence VHX-600 erfolgen. Hier ergab sich zum Teil ein Unterschied zwischen dem optischen Erscheinungsbild der Oberflächen und dem tatsächlichen Lochkorrosionsangriff. Abweichend davon wurden die Lochtiefen des Werkstoffs 1.4003 aufgrund des ausgeprägten flächenhaften Angriffs, anhand von Schliffbildern ermittelt. In Abb. 37 werden einige Beispiele der Schliffbilder und die daran ermittelten Lochtiefen gezeigt. Die so erhaltenen Ergebnisse wurden gemeinsam mit den Lochtiefen der übrigen Werkstoffe in der Abb. 38 zusammengefasst.

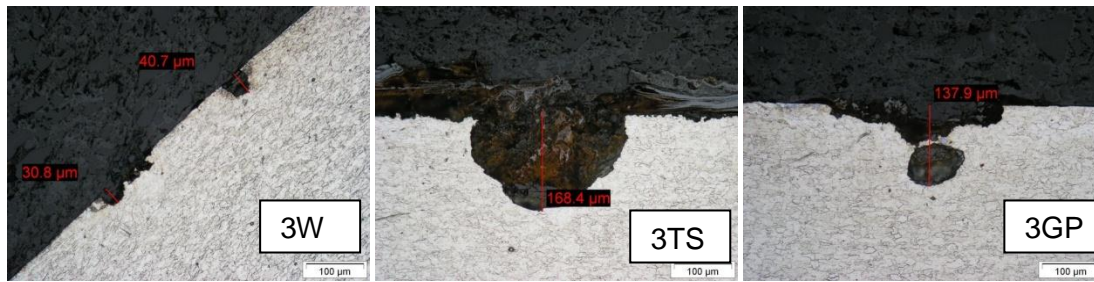


Abb. 37: metallographische Schlibfbilder durch Lochkorrosionserscheinungen am Werkstoff 1.4003

An den Proben mit glasperlengestrahelter Oberfläche konnten an den meisten Werkstoffen Lochtiefen im Bereich um 100 µm festgestellt werden. Auch die Referenzproben 1GP und 2GP, welche für den Einsatz im Schwimmbad nur bei regelmäßiger Reinigung oder ständiger Umspülung mit Wasser bzw. für nichttragende Elemente eingesetzt werden dürfen, weisen bei dieser Oberflächengüte ebenfalls ausgeprägte Korrosionserscheinungen auf. Lediglich am molybdänlegierten, ferritischen Stahl 1.4521 sowie am Lean-Duplex 1.4062 konnten keine Löcher festgestellt werden.

An den trockengeschliffenen Proben konnte nur an der Probe 1TS ein Korrosionsangriff in Form von Lochkorrosion mit einer Tiefe um 110 µm festgestellt werden. Der Werkstoff 1.4003 weist auch in der Oberflächenausführung TS einen ausgeprägt flächenhaften Materialabtrag auf.

Bei der Oberflächenausführung Walzoberfläche weist die Probe 2W aus 1.4404 mit Werten bis 170 µm sehr hohe Lochtiefen auf.

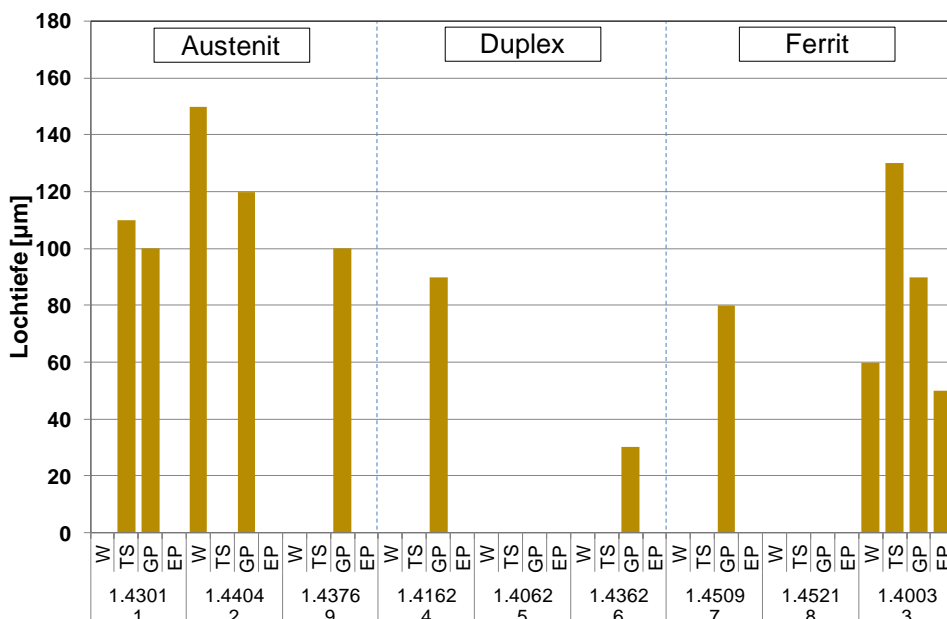


Abb. 38: Lochtiefen an Proben aus der Schwimmhallenauslagerung nach Versuchsende

4.1.4 Lebensmittelindustrie ^(HTWG)

Die Ergebnisse der Auslagerung in der Lebensmittelindustrie werden in den Tab. 9 bis 11 dargestellt.

An der Maschine A (Verpackung von Wurstwaren) konnten nach insgesamt 18 Monaten Auslagerungszeit zu keinem Zeitpunkt und an keiner der Proben Korrosionserscheinungen festgestellt werden. Das Ergebnis der Begutachtung wurde in den Tabellen dann mit „ohne Beanstandung“ (o.B.) eingetragen (Tab. 9).

Tab. 9: Probenzustand Auslagerungsbetrieb A

Maschine A, R535,124827, 03.02.2010					
Probenbezeichnung		Probenzustand			
		Datum: 3.2.2010	Datum: 27.04.2010	Datum: 17.08.2010	Datum: 5.5.2011
1W	Rahmen 1	o.B	o.B	o.B	o.B
1EP		o.B	o.B	o.B	o.B
2W		o.B	o.B	o.B	o.B
2EP		o.B	o.B	o.B	o.B
3W		o.B	o.B	o.B	o.B
3EP		o.B	o.B	o.B	o.B
4W	Rahmen 2	o.B	o.B	o.B	o.B
4EP		o.B	o.B	o.B	o.B
5W		o.B	o.B	o.B	o.B
5EP		o.B	o.B	o.B	o.B
6W		o.B	o.B	o.B	o.B
6EP		o.B	o.B	o.B	o.B
7W	Rahmen 3	o.B	o.B	o.B	o.B
7EP		o.B	o.B	o.B	o.B
8W		o.B	o.B	o.B	o.B
8EP		o.B	o.B	o.B	o.B
9W		o.B	o.B	o.B	o.B
9EP		o.B	o.B	o.B	o.B

An den Proben im Auslagerungsbetrieb B (Tab. 10), in dem die Proben in einer Umgebung mit salzhaltiger Lake für Feta-Käse ausgelagert sind, konnte bei den Werkstoffen 7, 8 und 9 ein deutlicher Korrosionsbefall festgestellt werden. Bei dem Werkstoff Nr. 3 gab es an der Probe W, d.h. im Anlieferzustand eine erhebliche Unsicherheit in der Bewertung in der Weise, dass bereits nach vier Monaten Expositionszeit an den Proben 3W leichte Korrosionserscheinungen festgestellt wurden, die sich nicht veränderten und später als unsicher detektierbar eingestuft wurden, trotzdem wurde hier eine Korrosion der Stufe 1 vergeben. Es gab weiterhin einen Fehler bei der Datenübertragung was dazu führte, dass die Werkstoffe 7, 8 und 9 bei dem Inspektionstermin am 08.10. 2011 nicht bewertet wurden. Nach ca. einem Jahr konnte an den Proben des Werkstoffs 1.4509 ein leichter Korrosionsbefall festgestellt werden. Der Korrosionsbefall an dem Ferrit 1.4003 verblieb auf dem gleichen Niveau. Die kaltgewalzten Proben des ferritischen Werkstoffs 1.4521 und des austenitischen manganlegierten Stahles 1.4376 weisen nach der bisher vergangenen Auslagerungszeit, optisch einen mittelschweren Korrosionsangriff auf der als Korrosion Stufe 2 eingeordnet wurde.

Tab. 10: Probenzustand Auslagerungsbetrieb B

Maschine B, R350,2361, 24.02.2010							
Probenbez.		Probenzustand					
		Datum: 24.3.2010	Datum: 11.05.2010	Datum: 05.07.2010	Datum: 08.10.2010	Datum: 07.02.2011	Datum: 04.07.2011
1W	Rahmen 1	o.B	o.B	o.B	o.B	o.B	o.B
1EP		o.B	o.B	o.B	o.B	o.B	o.B
2W		o.B	o.B	o.B	o.B	o.B	o.B
2EP		o.B	o.B	o.B	o.B	o.B	o.B
3W		o.B	o.B	Korrosion Stufe 1	Korrosion Stufe 1	Korrosion Stufe 1	Korrosion Stufe 1
3EP		o.B	o.B	o.B	o.B	o.B	o.B
4W	Rahmen 2	o.B	o.B	o.B	o.B	o.B	o.B
4EP		o.B	o.B	o.B	o.B	o.B	o.B
5W		o.B	o.B	o.B	o.B	o.B	o.B
5EP		o.B	o.B	o.B	o.B	o.B	o.B
6W		o.B	o.B	o.B	o.B	o.B	o.B
6EP		o.B	o.B	o.B	o.B	o.B	o.B
7W	Rahmen 3	o.B	o.B	o.B		Korrosion Stufe 1	Korrosion Stufe 1
7EP		o.B	o.B	o.B		Korrosion Stufe 1	Korrosion Stufe 1
8W		o.B	o.B	o.B		Korrosion Stufe 1	Korrosion Stufe 1
8EP		o.B	o.B	o.B		o.B	Korrosion Stufe 1
9W		o.B	o.B	o.B		Korrosion Stufe 2	Korrosion Stufe 2
9EP		o.B	o.B	o.B		o.B	o.B

In Tab. 11 wird ersichtlich, dass nach neun Monaten Auslagerung im Betrieb C keine Korrosionserscheinungen beobachtet wurden.

Tab. 11: Probenzustand Auslagerungsbetrieb C

Maschine C, R535,125944, 15.10.2010				
Probenbezeichnung		Probenzustand		
		Datum:15.10.2010	Datum:11.12.2010	Datum:07.07.2011
1W	Rahmen1	o.B	o.B	o.B
1EP		o.B	o.B	o.B
2W		o.B	o.B	o.B
2EP		o.B	o.B	o.B
3W		o.B	o.B	o.B
3EP		o.B	o.B	o.B
4W	Rahmen2	o.B	o.B	o.B
4EP		o.B	o.B	o.B
5W		o.B	o.B	o.B
5EP		o.B	o.B	o.B
6W		o.B	o.B	o.B
6EP		o.B	o.B	o.B
7W	Rahmen3	o.B	o.B	o.B
7EP		o.B	o.B	o.B
8W		o.B	o.B	o.B
8EP		o.B	o.B	o.B
9W		o.B	o.B	o.B
9EP		o.B	o.B	o.B

4.2 Ergebnisse der Auslagerung in künstlichen Klimaten

4.2.1 Kombinierte Klimaprüfung ^(BAM)

Die Oberflächenzustände der Werkstoffe nach der kombinierten Klimaprüfung in der Salzsprühkammer mit anschließender Feuchtlagerung sind in Abbildung 39 exemplarisch an Proben in Oberflächenausführung *W* dargestellt. Es konnte an vielen Proben Korrosion im Bereich der unteren Abtropfkante, am Schweißpunkt sowie bei einigen Proben Spaltkorrosion unter dem Abdecklack festgestellt werden, diese Erscheinungen gingen nicht in die Bewertung ein. Ein Einfluss der Kaltumformung im Bereich der Abkantung bei Oberflächenausführung *W* konnte an keiner Probe festgestellt werden.








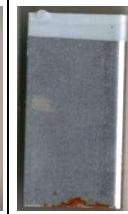

Austenit			Duplex			Ferrit		
1W	2W	9W	4W	5W	6W	7W	8W	3W
1.4301	1.4404	1.4376	1.4162	1.4062	1.4362	1.4509	1.4521	1.4003
								

Abb. 39: Probenzustände in Oberflächenausführung *W* nach **kombinierter Klimaprüfung**

Der molybdänlegierte Standardaustenit 1.4404 zeigte ein auffällig negatives Ergebnis bei der kombinierten Klimaprüfung und konnte die erwartete gute Korrosionsbeständigkeit nicht vorweisen. Er lag z.T. sogar signifikant unter den Ergebnissen der molybdänfreien Werkstoffe, die in gewalzter Oberflächenausführung *W* überwiegend gute Bewertungsgrade erreichten (Abb. 40). Ausnahme war hier nur der ferritische Werkstoff 1.4003, der generell die schlechtesten Ergebnisse bei dieser Prüfung zeigte. Überzeugen konnten die drei Duplexstähle, die in allen Oberflächenausführungen akzeptable Bewertungsgrade erreichten. Ein positiver Einfluss der Oberflächenbearbeitung konnte für den Werkstoff 1.4404 in den Oberflächenausführungen *TS* und *EP* festgestellt werden. Hier war eine Verbesserung um zwei Bewertungsgrade möglich, durch Glasperlenstrahlen *GP* konnte hingegen keine Verbesserung erzielt werden.

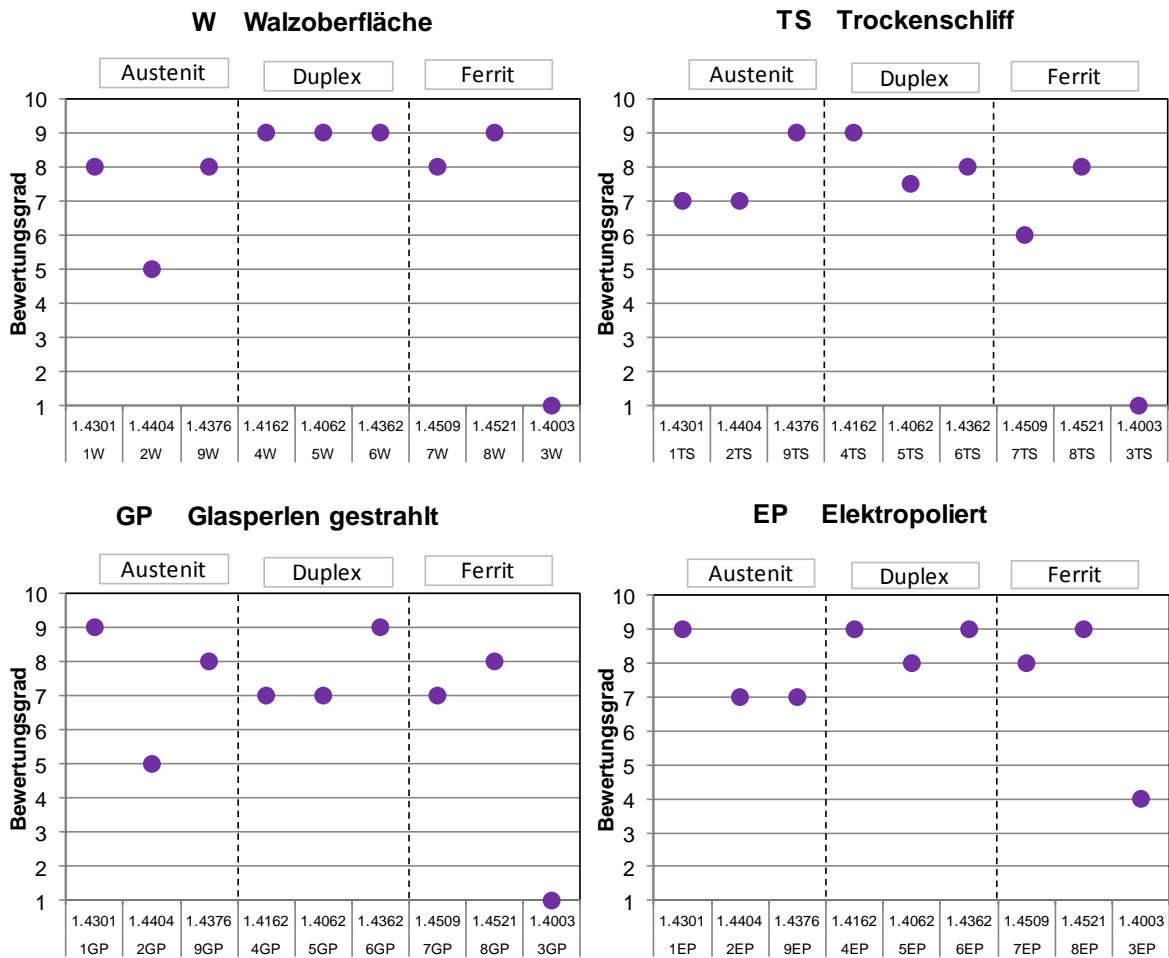


Abb. 40: Bewertungsgrade von Proben mit unterschiedlichen Oberflächenausführungen nach **kombinierter Klimaprüfung**

Die Schweißnähte sowie die WEZ der Verbindungsgeschweißten Proben S zeigten im Vergleich zur Oberflächenausführung W bei den meisten Werkstoffen nur geringfügig niedrigere Bewertungsgrade von 7-9 (Abb. 41). Ein signifikant schlechteres Ergebnis im Vergleich zur Walzoberfläche zeigte hier der Werkstoff 1.4509, in Abbildung 41 ist der bewertete Schweißnahtbereich exemplarisch dargestellt.

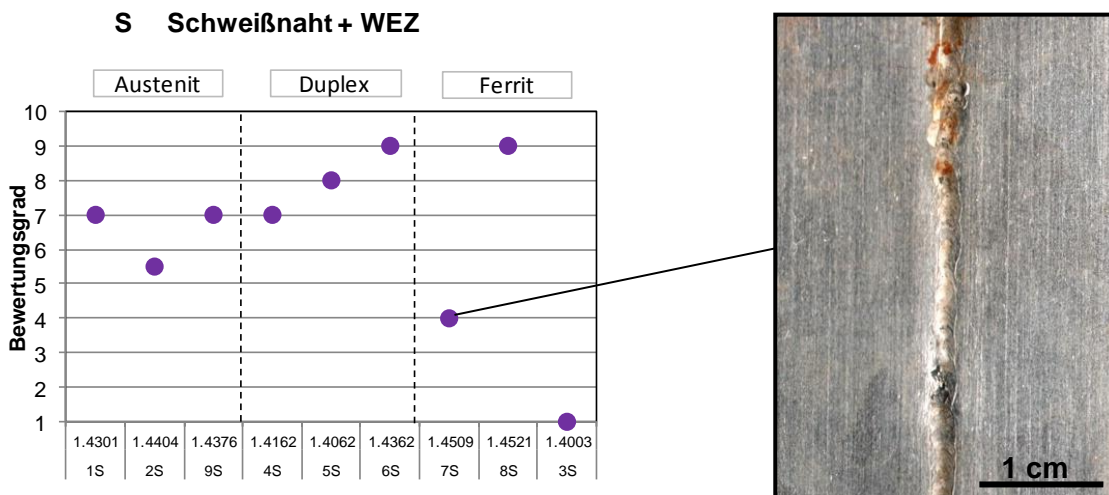


Abb. 41: Bewertungsgrade der Verbindungsgeschweißten Proben nach **kombinierter Klimaprüfung**

4.2.2 Kesternichtest ^(HTWG)

4.2.2.1 Versuch 1 mit 0,2 L SO₂:

Nach dem ersten Zyklus konnte vor allem an den Probenblechen 3EP, 3GP, 3TS, 3W sowie 7GP, 7TS ein Korrosionsangriff festgestellt werden. Die nach dem ersten Prüfzyklus korrosionsfreien Proben zeigten auch nach dem 5. Zyklus noch keinerlei Korrosionserscheinungen. Die Korrosionsangriffe der nach dem ersten Zyklus angegriffenen Proben verstärkten sich über den Versuchszeitraum nur geringfügig. Die Bewertungsgrade nach 5 Testzyklen im Kesternichtest werden in Abbildung 42 gezeigt. Der ferritische Werkstoff 1.4003 zeigt unter diesen Expositionsbedingungen Korrosionserscheinungen in allen Oberflächenausführungen. Ebenso zeigte der ferritische Werkstoff 1.4509 in den Oberflächenzuständen GP, TS und W Korrosionserscheinungen. Im Zustand EP konnte jedoch kein Korrosionsangriff festgestellt werden. Bei der gegenüberstellenden Betrachtung der verschiedenen Oberflächenausführungen wird ersichtlich, dass sich die elektropolierte Oberfläche deutlich korrosionsbeständiger verhält als die glasperlengestrahelte Oberfläche, welche optisch die ausgeprägtesten Korrosionserscheinungen aufweist. An den austenitischen Werkstoffen 1.4301, 1.4404 und 1.4376, sowie an den Duplexwerkstoffen 1.4162, 1.4062 und 1.4362 als auch an dem molybdänhaltigen Ferrit 1.4521 konnte nach der Versuchsdurchführung kein Korrosionsangriff festgestellt werden.

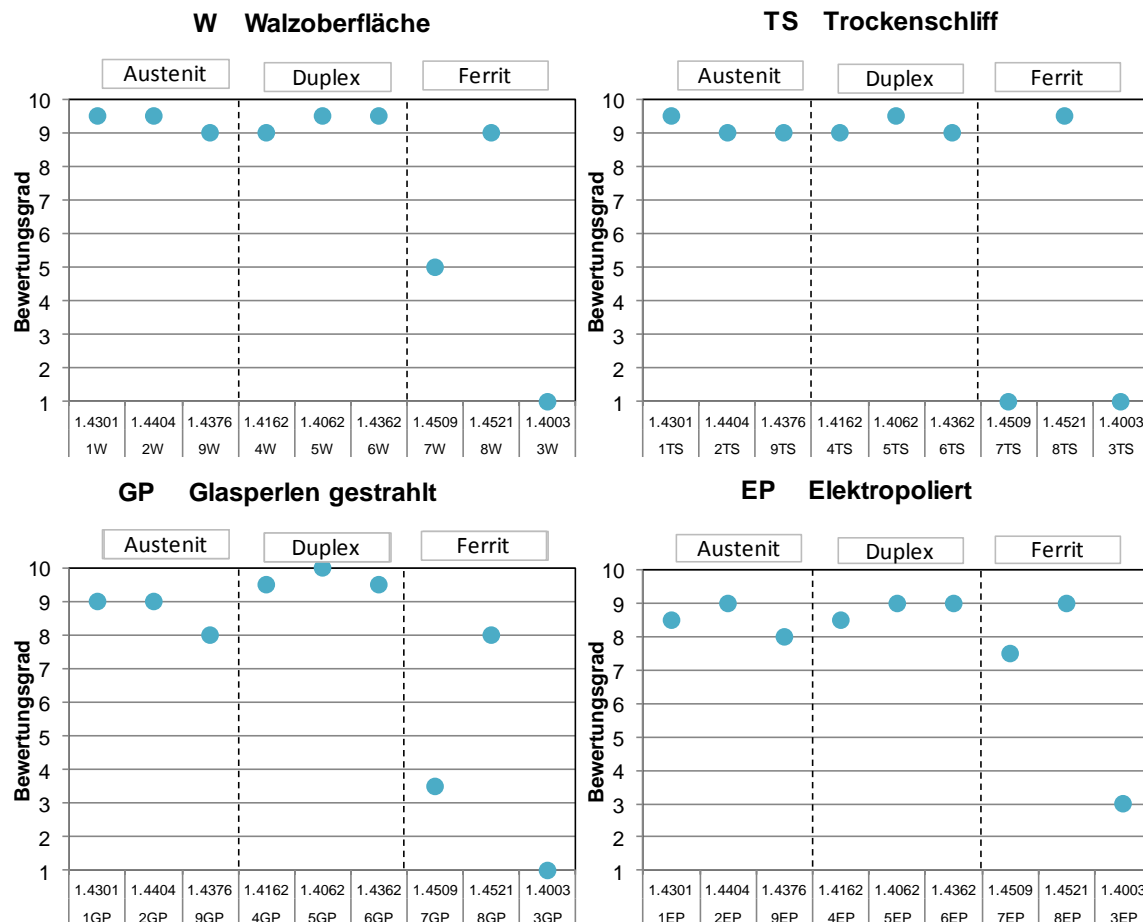


Abb. 42: Bewertungsgrade von Proben mit unterschiedlichen Oberflächenausführungen nach Kesternichtest mit 0,2l SO₂

Die Lochtiefenvermessung der korrodierten Proben wurde mit dem Digitalmikroskop VHX-600 der Firma Keyence durchgeführt. In der nachfolgenden Abb. 43 sind die Ergebnisse der optischen Lochtiefenvermessung an den oben genannten Proben, welche Korrosionserscheinungen aufweisen aufgeführt. Hier ist ersichtlich, dass nur an den Proben der Werkstoffe 1.4003 (3) und 1.4509 (7) Korrosionserscheinungen in Form von Lochkorrosion aufgetreten sind. Das tiefste erfasste Loch konnte an dem Ferrit 1.4003 in der elektropolierten Oberfläche, mit 150 μm festgestellt werden. Die Proben der restlichen Oberflächenausführungen GP, TS und W zeigten dagegen nur Lochtiefen um 60 μm . Auch am Werkstoff 1.4509, traten in den Oberflächenzuständen GP und TS Löcher auf, wobei hier jedoch die trockengeschliffene Probe etwa doppelt so tiefe Löcher aufwies als das vergleichbare glasperlengestrahlte Probenblech.

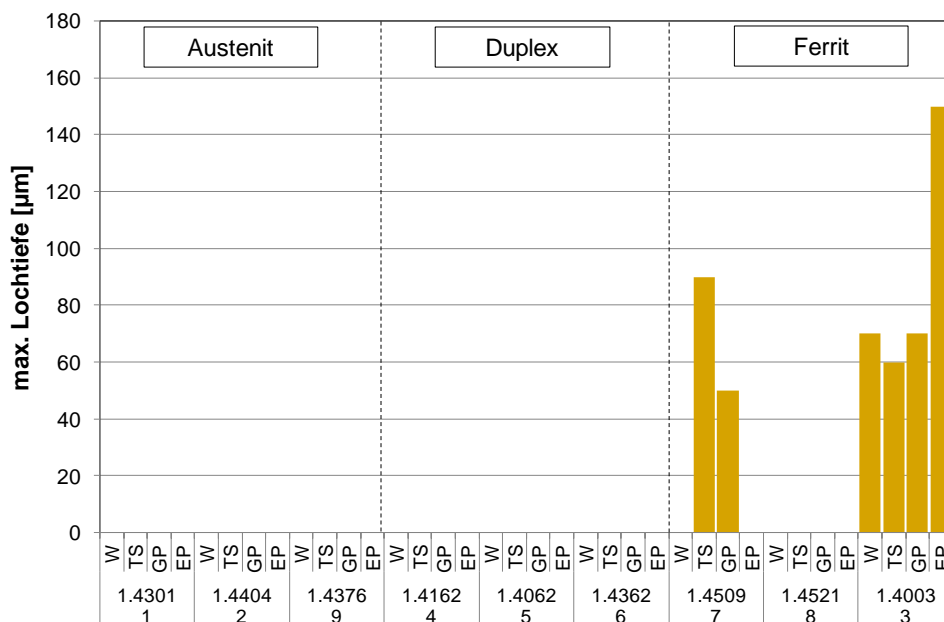


Abb. 43: Ergebnisse der optischen Lochtiefenvermessungen an Proben nach der Auslagerung im **Kesternich-Test mit 0,2 l SO₂**

Bei der Durchführung der Versuche wurde zudem der Gewichtsverlust der Proben ermittelt (Abbildung 44). Hierzu wurde vor Beginn der Auslagerung das Gewicht jeder einzelnen Probe, genau bestimmt. Die zweite Erfassung des Gewichts erfolgte nach Beendigung der Versuchsreihen. Zuvor wurden die Proben mit Antox gebeizt, um Korrosionsprodukte bzw. Ablagerungen aus den Versuchen zu entfernen. Interne Untersuchungen ergaben, dass sich der Einfluss der Beizpaste lediglich in der dritten Nachkommastelle bemerkbar macht. Bei den Ergebnissen ist zu berücksichtigen, dass sich der Gesamtgewichtsverlust aus einem allgemeinen Oberflächenabtrag und dem Lochkorrosionsangriff zusammensetzt.

Im Ranking der Werkstoffe korrelieren die Ergebnisse der Gewichtsverluste sehr gut mit den erfassten Lochtiefen (Abb. 43 und 44).

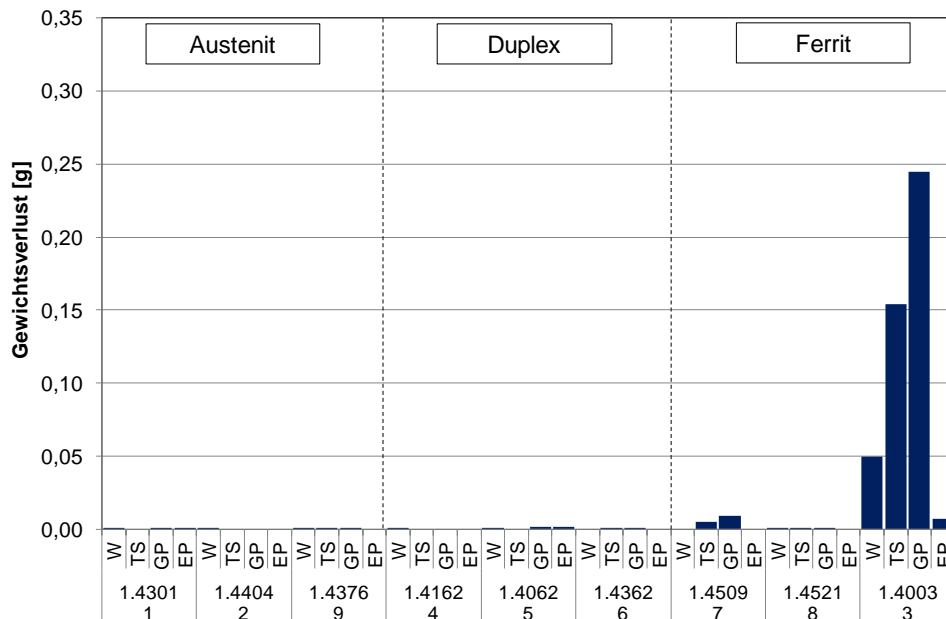


Abb. 44: Gewichtsverluste von Proben mit unterschiedlichen Oberflächenausführungen nach **Kesternichtest mit 0,2 l SO₂**

Die Proben des ferritischen Werkstoffs 1.4003 zeigen die absolut höchsten Gewichtsverluste, wobei der Maximalwert mit 1,198 % bzw. 0,245 g an der Probe 3GP festgestellt wurde. Im elektropolierten Zustand hatte der Werkstoff 1.4003 den niedrigsten Massenverlust obwohl in diesem Zustand die tiefsten Löcher beobachtet wurden. Hier handelt es sich vermutlich um vereinzelte, jedoch tiefere Löcher. Dieser Eindruck verstärkt sich bei der vergleichenden Betrachtung der Proben, da der Korrosionsangriff an der Probe 3EP weniger flächig ausfällt als an 3GP. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Probe 3GP, an welcher der flächigste Korrosionsangriff zu sehen ist, den höchsten Gewichtsverlust aufzeigen müsste, was sich bei der Gewichtsdocumentation bestätigt.

Bei Betrachtung der Ergebnisse der Massenverluste wird ersichtlich, dass die austenitischen und die Lean-Duplex-Stähle sowie der molybdänlegierte ferritische Stahl 1.4521 unter diesen Prüfbedingungen kaum Korrosionserscheinungen aufzeigen. Mit dem schlechtesten Ergebnis, d.h. mit dem höchsten Gewichtsverlust, wurden die ferritischen Werkstoffe 1.4003 und 1.4509 erfasst, wobei der geringe Chromgehalt des Werkstoffs 1.4003 zu dem mit Abstand größten Abtrag führte.

4.2.2.2 Versuch 2 mit 2,0 l SO₂

Nach dem ersten Zyklus mit 2,0 l aktivem SO₂, bei 8 Stunden Temperaturlagerung und 16 Stunden Abkühlphase, konnten bereits an einer Vielzahl von Proben bräunliche, meist perlenförmige Verfärbungen festgestellt werden. Der Bereich rund um das Loch zur Aufhängung sowie der mit Schnur überlagerte Bereich werden bei der Begutachtung nicht berücksichtigt.

Im Vergleich zum oben aufgeführten Versuch mit einem Zehntel der aktiven SO_2 -Menge konnte hier bereits nach dem ersten Testzyklus ein stärkerer Korrosionsangriff festgestellt werden. Bei Betrachtung der Übersicht der elektrolytierten Proben wird deutlich, dass bereits auf allen Werkstoffen außer 1.4404, 1.4362 und 1.4521 dunkelbraune Verfärbungen auftraten. Die auftretenden Korrosionsangriffe verstärkten sich über den Verlauf von fünf Testzyklen, so dass nach Beendigung des Versuchs alle Proben Korrosionserscheinungen zeigten. Die Bewertungsgrade nach 5 Testzyklen im Kesternichtest werden in Abbildung 45 aufgezeigt. Der ferritische Werkstoff 1.4003 zeigt zusammen mit dem ebenfalls ferritischen Werkstoff 1.4509 die schlechteste Beständigkeit. Die bei optischer Auswertung besten Ergebnisse werden mit dem molybdänlegierten austenitischen Werkstoff 1.4404 und dem ebenfalls mit Molybdän legierten ferritischen Werkstoff 1.4521 erzielt. Die Messung der Massenverluste bestätigt dieses Ergebnis (Abb. 46). Die Lean-Duplex-Werkstoffe verhalten sich gleich gut oder besser als der Standard Austenit 1.4301, wobei der manganlegierte Lean-Duplex-Stahl 1.4162 einen Ausreißer im trocken geschliffenen Zustand TS zeigt. Eine gute Unterscheidung zwischen flächigem Abtrag und Lochkorrosion wird durch den Vergleich zwischen Massenverlust und Lochtiefe erkennbar. In der Lochtiefenvermessung wurden an den Duplex-Werkstoffen 1.4162, 1.4062 und 1.4362 keine Löcher festgestellt obwohl diese einen deutlichen Massenverlust erfahren hatten. An den stark korrodierten Proben des Austenits 1.4301 konnte dagegen eine durchschnittliche Lochtiefe von $140\ \mu\text{m}$ festgehalten werden.

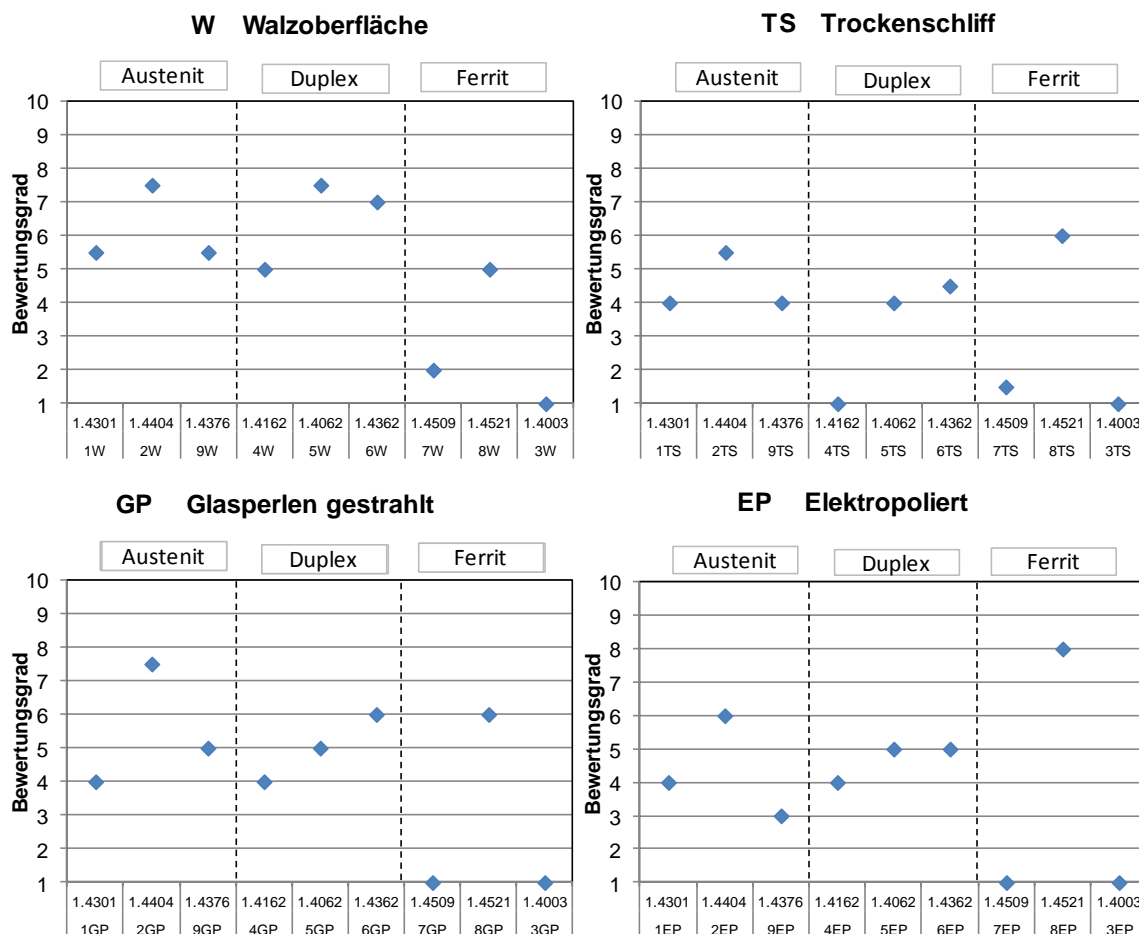


Abb. 45: Bewertungsgrade von Proben mit unterschiedlichen Oberflächenausführungen nach Kesternichtest mit $2,0\ \text{l SO}_2$

Die Oberflächenausführung nimmt bei diesem Test einen deutlichen Einfluss, der besonders am Anfang der Versuche deutlich wird. Auf den glasperlengestrahlenen Proben konnte bereits nach einem Zyklus an den Werkstoffen 1.4301, 1.4003, 1.4162, 1.4509 und 1.4376 deutliche Korrosionsspuren festgestellt werden. Vor allem die untere Ecke, an dem sich das Kondenswasser vor dem Abtropfen sammelt ist relativ stark von Korrosion angegriffen. Die grundsätzliche Einstufung der Beständigkeit zwischen den Werkstoffen bleibt allerdings weitgehend erhalten. An den trocken geschliffenen Proben zeigte sich nach dem ersten Zyklus ein ähnliches Bild wie bei den elektropolierten Proben. Vor allem an den Proben 3, 4, 5, 7 und 9 konnte bereits nach dem ersten Zyklus leichte bräunliche Verfärbungen festgestellt werden. Der Effekt verstärkte sich über die fünf Testzyklen, wobei nach der Durchführung des Versuchs an allen Proben starke Verfärbungen festgehalten wurden. Insgesamt korrelieren die an den unterschiedlichen Proben erfassten Massenverluste relativ gut untereinander und zeigen ähnliche Tendenzen zwischen den einzelnen Oberflächenausführungen. Tendenziell weisen die trockengeschliffenen Proben den höchsten und die elektropolierten Proben den geringsten Massenverlust auf, wobei einzelne Wert abweichend sind. Bei den trockengeschliffenen Proben ist darauf zu achten, dass nur eine Seite behandelt wurde. Daher kann nicht gesagt werden, ob der Massenverlust verstärkt auf der behandelten oder unbehandelten Seite aufgetreten ist. Schließlich konnten auf beiden Seiten Korrosionsangriffe festgestellt werden.

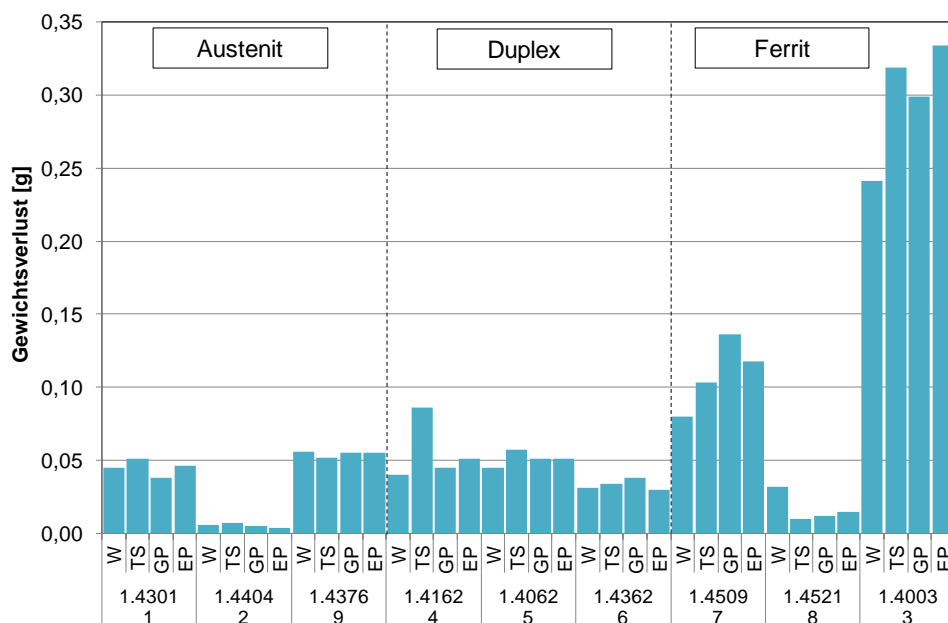


Abb. 46: Gewichtsverlust von Proben mit unterschiedlichen Oberflächenausführungen nach **Kesternichtest mit 2,0 l SO₂**

Um neben dem Massenverlust auch Informationen über die Ausprägung der örtlichen Korrosionserscheinungen zu erhalten, wurde auch an diesen Proben eine Lochtiefenvermessung durchgeführt. Die Vermessung der Löcher wurde bei 200facher Vergrößerung mit dem Videomikroskop Keyence VHX600 durchgeführt.

Bei der Lochtiefenvermessung konnte bei den Proben der Lean-Duplex-Werkstoffe 1.4162 und 1.4062 an keiner Oberflächenausführung Korrosionserscheinungen in Form von Lochkorrosion festgestellt werden (Abb. 47). Ebenfalls wurde an den trockengeschliffenen Proben der austenitischen Werkstoffe 1.4404 und 1.4376, welche nur einen sehr geringen Massenverlust aufwiesen, keine Lochkorrosion festgestellt. Das tiefste Loch wurde an der Probe 8 (W) mit 160 μm gemessen.

Im Gesamtvergleich der Werkstoffe untereinander konnten am Austenit 1.4301 am meisten Löcher erfasst werden. Die ermittelten Lochtiefen zwischen 80 μm (GP) und 170 μm (EP), gehören im Gesamtranking mit zu den am markantesten ausgeprägten Lochkorrosionserscheinungen. Am austenitischen Werkstoff 1.4404, war die Anzahl der Löcher deutlich geringer und die maximal ermittelten Lochtiefen liegen hier zwischen 40 μm und 80 μm deutlich niedriger.

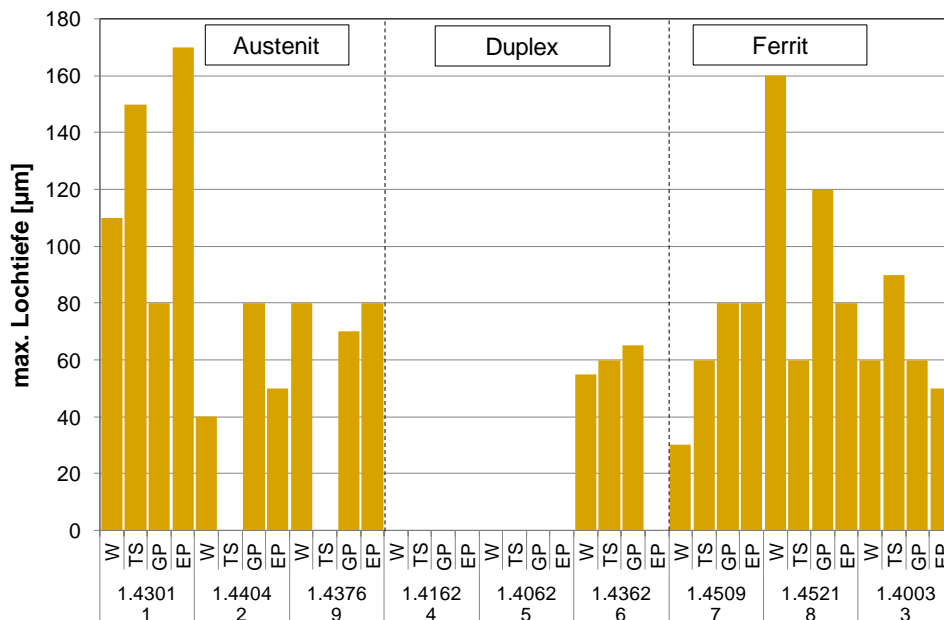


Abb. 47: maximale Lochtiefen von Proben mit unterschiedlichen Oberflächenausführungen nach **Kesternichtest mit 2,0l SO₂**

Eine Korrelation zwischen dem prozentual zum Ausgangsgewicht erfassten Gewichtsverlust und den erfassbaren Lochtiefen kann nicht festgestellt werden. So konnte der größte Gewichtsverlust an der Probe 3EP ermittelt werden. Mit einer durchschnittlichen Lochtiefe um 50 μm liegt dieser Wert beispielsweise deutlich niedriger als bei der Probe 1EP mit gleicher Oberflächenausführung. Der spezifische Gewichtsverlust ist an dieser Probe jedoch deutlich geringer als bei der Probe 3EP, was auf einen größeren Anteil an gleichmäßiger Flächenkorrosion an den Proben des Werkstoffs 1.4003 hinweist.

4.2.3 Spannungsrisskorrosionsversuche ^(BAM)

Die Ergebnisse der Spannungsrisskorrosionsversuche im Magnesiumchlorid-Tropfentest sind zusammenfassend für alle geprüften Varianten in Tabelle 12 abgebildet. Es wird deutlich, dass im Laufe der Versuche ausschließlich Proben aus Werkstoffen mit austenitischem Gefüge Spannungsrisskorrosion (SpRK) zeigten, die Ferrite und die Duplexstähle hingegen auch nach 10.000 Stunden Versuchsdauer keine Anzeichen von SpRK aufwiesen. Abbildung 48 zeigt beispielhaft Korrosionserscheinungen, die bei den Untersuchungen festgestellt wurden. Neben Spannungsrisskorrosion waren bei den austenitischen Werkstoffen auch Lochkorrosionserscheinungen vorhanden. Bei den ferritischen Werkstoffen traten vorwiegend Lochkorrosionserscheinungen mit z.T. muldenförmiger Ausprägung auf, wie sie für diese Korrosionsprüfung zu erwarten waren. Die Duplexstähle zeigten ebenfalls ausgeprägte Lochkorrosionserscheinungen und auch selektive Korrosionserscheinungen.

Tab. 12: Ergebnisse der SpRK Versuche

		MgCl ₂ Tropfentest 30 °C ; Probenentnahme nach:						
		Bezeichnung	300 h	600 h	1.200 h	2.400 h	4.800 h	10.000 h
Austenit	1.4301 X5CrNi18-10	1W	L					
		1TS	L	L	L			
		1GP						
	1.4404 X2CrNiMo17-12-2	2W		L				
		2TS		L	L	L		
		2GP		L				
	1.4376 X8CrMnNi19-6-3	9W						
		9TS						
		9GP	L					
Duplex	1.4162 X2CrMnNiN22-5-2	4W	L	S	S	L	L	S/L
		4TS		S	L	S/L	L	
		4GP	L	S	L	L	S/L	
	1.4062 X2CrNiN22-2	5W	L	S/L	S	S	S	L
		5TS	L	L	L	S	S	
		5GP	S	S	S	L	L	
	1.4362 X2CrNiN23-4	6W			S	S/L	S/L	S/L
		6TS	L	S	S	S	S	
		6GP	S	S		S	S	
Ferrit	1.4509 X2CrTiNb18	7W		L	L	L	L	L
		7TS	L	L	L	L	L	
		7GP	L	L	L	L	L	
	1.4521 X2CrMoTi18-2	8W			L	L	L	L
		8TS	L	L		L	L	
		8GP	L	L	L	L	L	
	1.4003 X2CrNi12	3W	L	L	L	L	L	L
		3TS		L	L	L	L	
		3GP	L	L	L	L	L	

- Prüfung ohne SpRK Befund
■ Spannungsrisskorrosion zum Zeitpunkt x festgestellt
 L = Lochkorrosion
 S = selektive Korrosion

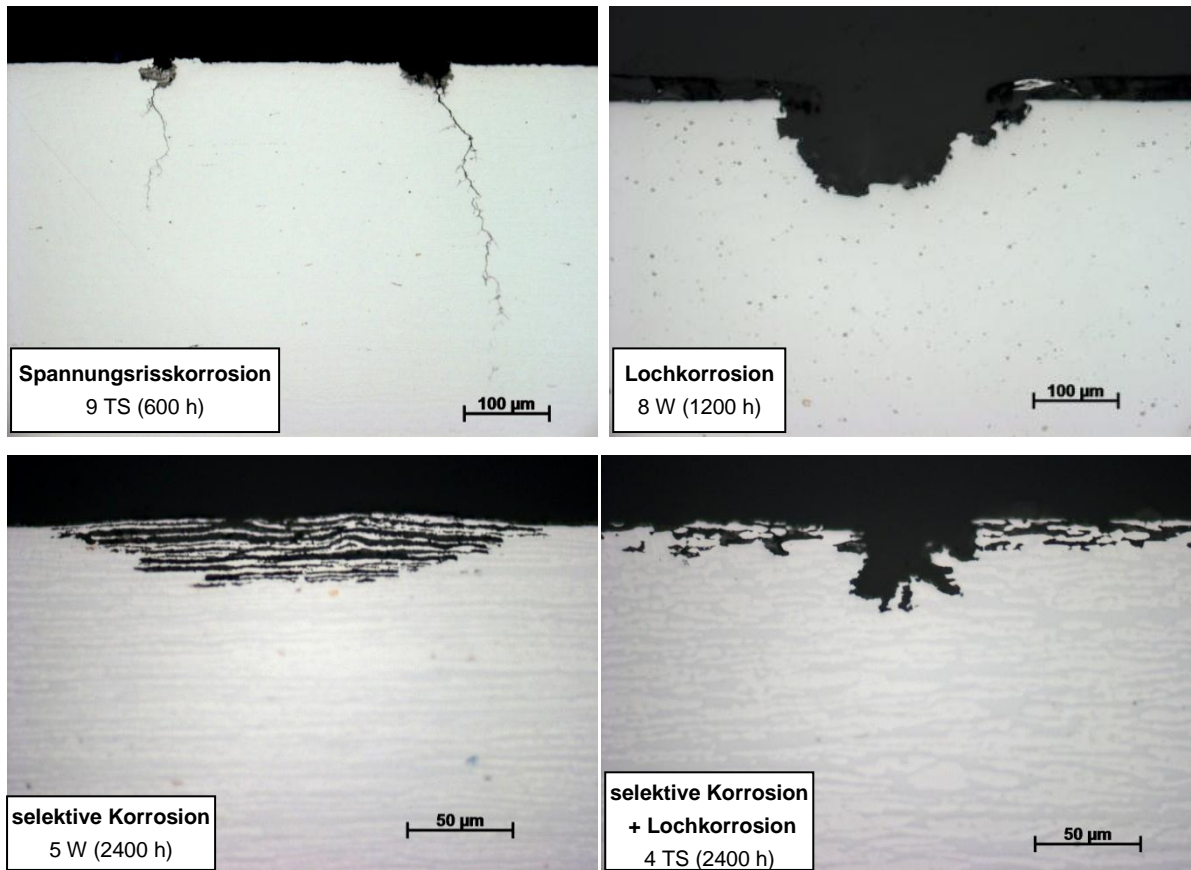


Abb. 48: Metallographische Querschliffe durch Bügelproben nach $MgCl_2$ Tropfentest; Beispiele festgestellter Korrosionserscheinungen

4.2.4 Auslagerung in Erde ^(HTWG)

Vor der Begutachtung der Proben nach Beendigung der Auslagerungsversuche wurden die Probenbleche unter fließendem Wasser gereinigt und mit einer Kunststoffbürste von Erdresten und anderen Verunreinigungen befreit. Anschließend wurden die Proben zudem im Ultraschallbad gereinigt. Das Ergebnis der Auslagerung ist exemplarisch anhand der Oberflächenausführung GP in Abbildung 49 dargestellt. Es zeigt sich an allen Proben ein erkennbarer Rand am Übergang vom Probenteil, welcher in Erde steckte und dem Probenteil, welcher der Atmosphäre ausgesetzt war.

Die Proben wurden daraufhin mit einer Stereolupe begutachtet, jedoch konnten keinerlei Löcher oder andere Korrosionserscheinungen festgestellt werden. Bis auf die ersichtlichen Ablagerungen, welche vermutliche Verunreinigungen darstellen, konnten somit bei dieser Auslagerung in sandhaltigem und gut belüftetem Boden keine Veränderungen an den Werkstoffen beobachtet werden.

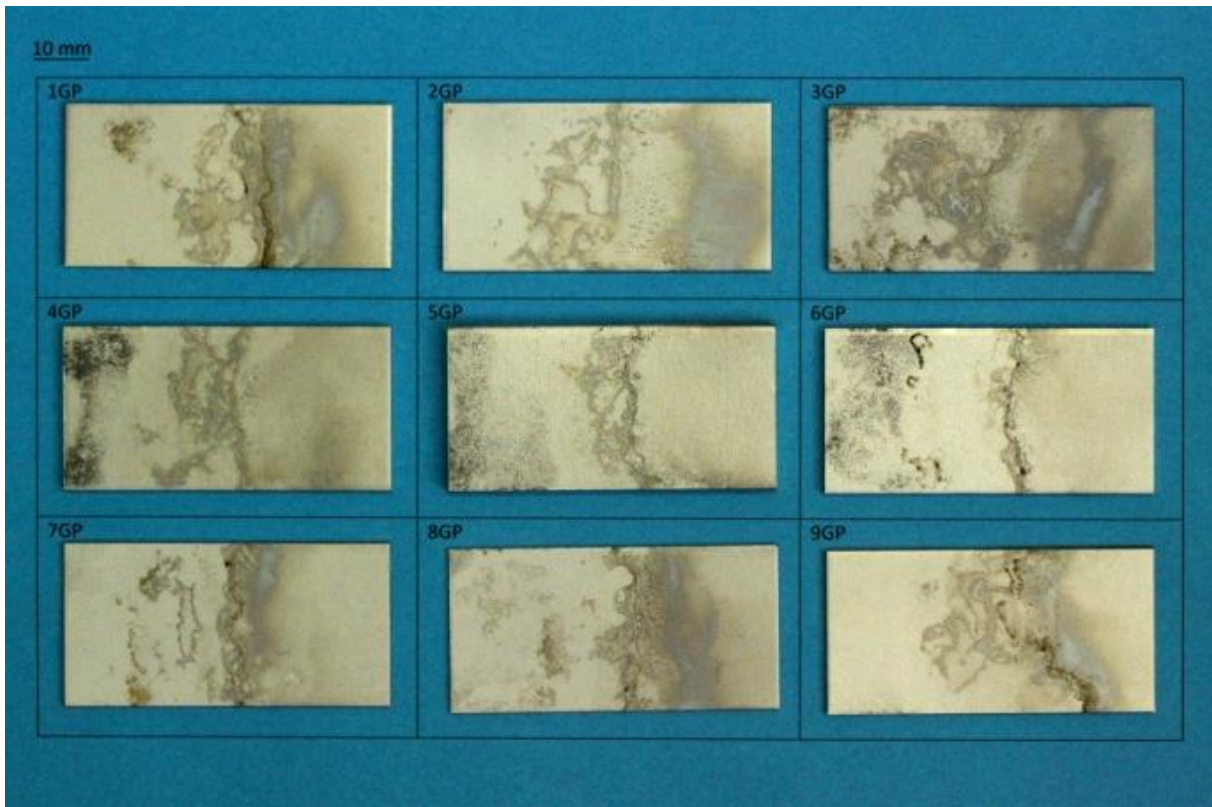


Abb. 49: Oberflächen der verschiedenen Werkstoffe in Oberflächenausführung GP nach Auslagerung in Erde

4.2.5 Industrielle Reiniger- und Desinfektionslösungen ^(HTWG)

4.2.5.1 ACIGEL VG7

Nach 1,5 Monaten Auslagerung in Acigel VG7 konnten mit Ausnahme der Proben 3TS und 3GP keine Veränderungen gegenüber dem Ausgangszustand festgestellt werden. Lediglich die glasperlengestrahnten und trockengeschliffenen Proben des Werkstoffs 1.4003 an der Dreiphasengrenze eine Ablagerung anhaftete, die sich jedoch ohne großen Aufwand entfernen lassen. Auf eine Darstellung der Werkstoffproben nach dem Ende der Auslagerung wird an dieser Stelle aufgrund der fehlenden Veränderungen verzichtet.

4.2.5.2 Supergel VG3

Nach 1,5-monatiger Auslagerung im Reiniger wurde der Versuch beendet. An keine der Proben konnte ein Korrosionsangriff festgestellt werden. Ebenfalls waren keine Verkrustungen oder andere Ablagerungen auf den Proben auszuweisen.

Wie in Abbildung 50 zu erkennen ist, konnte nach Beendigung der Auslagerung insbesondere bei den ferritischen Stählen im Bereich der Flüssigphase der ausgelagerten Proben eine regenbogenfarbige Verfärbung festgestellt werden, die auf das Vorliegen einer dünnen Anlaufschicht schließen lässt.

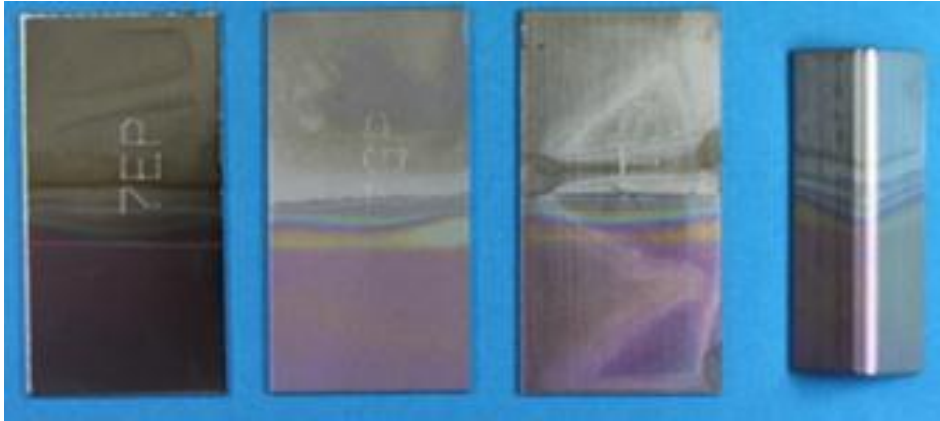


Abb. 50: Verfärbungen auf Oberflächen des Werkstoffes 1.4509 nach 1,5 monatiger Auslagerung in Supergel VG3

Eine weiterführende Untersuchung erschien bei dieser Auslagerung nicht zweckmäßig, da kein Korrosionsbefall festgestellt werden konnte. Daher wurde nur diese optische Bewertung durchgeführt.

4.2.5.3 TEGO 2000

Nach dreimonatiger Auslagerung im Reiniger wurde der Versuch beendet. An keiner der Proben konnte ein Korrosionsangriff festgestellt werden. Bei punktförmigen Verfärbungen an der Probe 3W konnte noch kein Angriff festgestellt werden. Ebenfalls waren keine Verkrustungen oder andere Ablagerungen auf den Proben auszuweisen.

Nur in der Flüssigphase der glasperlengestrahnten Proben konnte eine leichte, flächige Verfärbung festgestellt werden. Da diese Verfärbung an allen Werkstoffen in gleicher Weise auftrat ist davon auszugehen, dass dies auf die Oberflächenbehandlung zurückzuführen ist.

4.2.6 Natriumhypochlorid^(HTWG)

4.2.6.1 Versuchsreihe 1: NaClO bei 20°C:

Die Auslagerung wurde nach 4 Wochen beendet, da außer am ferritischen Werkstoff 1.4003 keine Veränderung festgestellt werden konnte. Die Abbildung 51 zeigt beispielhaft die Ausgangs- und Endzustände der Werkstoffe für die Oberflächenausführung Glasperlen gestrahlt GP.

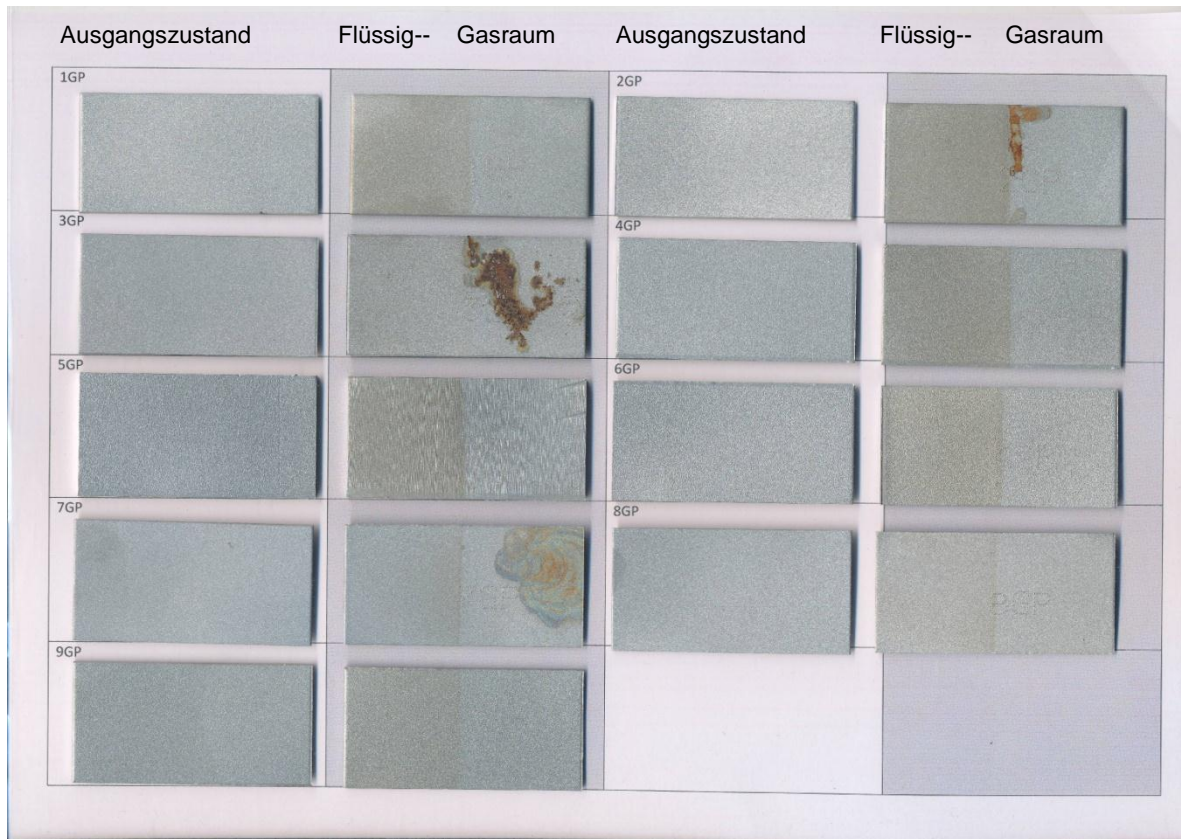


Abb. 51: Ausgangs- und Endzustand der GP-Oberflächen bei der Auslagerung in NaClO bei 20°C

Lediglich an der glasperlengestrahnten Probe des Werkstoffs 1.4003 konnten Löcher in der Gasphase festgestellt werden. Die Vermessung der Lochtiefen ergab Werte im Bereich um 100 µm. An allen anderen Proben der unterschiedlichen Werkstoffe und Oberflächenausführungen konnte kein Korrosionsangriff ermittelt werden. Bei den elektrolytierten Proben konnte am Lean-Duplex Werkstoff 1.4062 eine flächige Verfärbung in der Gasphase festgestellt werden, jedoch kein Korrosionsangriff. Ablagerungen konnten an der glasperlengestrahnten Proben des Werkstoffe 1.4404 sowie an der trockengeschliffenen Probe des Werkstoffs 1.4003 festgestellt werden.

4.2.6.2 Versuchsreihe 2: NaClO bei 50°C

Die Auslagerung wurde nach 3 Monaten beendet. Die nachfolgende Abbildung 52 zeigt exemplarisch die Endzustände der Werkstoffe in Oberflächenausführung GP. Bei Begutachtung der Übersichten wird deutlich, dass die Korrosionserscheinungen entweder in der Gasphase oder in der Dreiphasengrenze in Erscheinung treten.

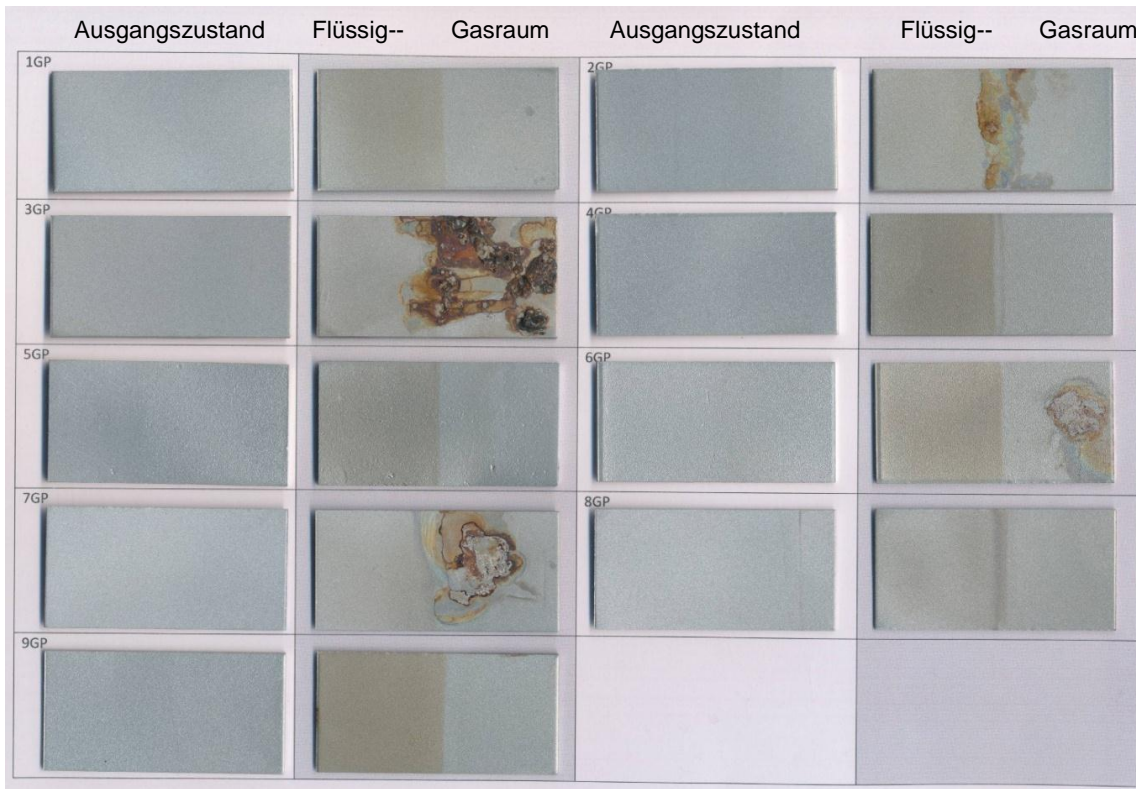


Abb. 52: Anfangs- und Endzustand der GP-Oberflächen bei der Auslagerung in NaClO bei 50°C

Die Lochtiefenvermessung wurde an den Proben durchgeführt, welche optisch erkennbare Korrosionserscheinungen oder andere Auffälligkeiten aufwiesen. Die im Ergebnis der Vermessung mit dem 3D-Videomikroskop VHX-600 ermittelte maximale Lochtiefe wird in der Abbildung 53 gezeigt.

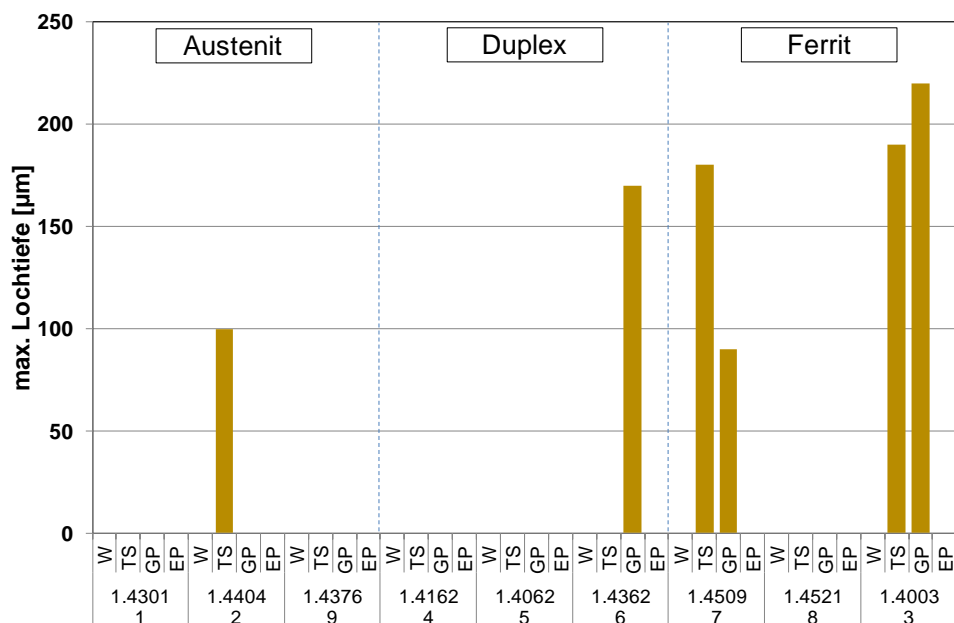


Abb. 53: Lochtiefenbestimmung nach Auslagerungsversuch in NaClO, T = 50°C

Die Abbildung 53 zeigt zusammen mit den Übersichtsbildern, einen deutlichen Einfluss der Oberflächenausführung auf die Korrosionsbeständigkeit in der chloridhaltigen Atmosphäre. An den elektropolierten und kaltgewalzten Proben konnten Verfärbungen, jedoch keine Korrosion in Form von Lochkorrosion festgestellt werden. Weiter zeigt sich, dass neben der Oberflächenausführung erwartungsgemäß auch der Werkstoff einen erheblichen Einfluss auf die Beständigkeit in der Natriumhypochlorit-Atmosphäre hat. An den rein ferritischen Werkstoffen 1.4003 (3) und 1.4509 (7) konnten Lochtiefen bestimmt werden. Dabei wies der Ferrit 1.4003 mit Lochtiefen um 200 μm im Zustand GP und im Zustand TS die größten Lochtiefen auf. Am Ferrit 1.4509 konnte im Zustand GP eine maximale Lochtiefe um 100 μm und im Zustand TS um 180 μm ermittelt werden. Am Duplexwerkstoff 1.4362 liegen die ermittelten Lochtiefen in der Oberflächenausführung GP im Bereich um 170 μm , während am Austenit 1.4404 in Oberflächenausführung TS eine maximale Lochtiefe von 100 μm ermittelt wurde.

4.3 Ergebnisse der elektrochemischen Untersuchungen

4.3.1 Potentiodynamische Polarisationsmessungen ^(BAM)

Bei den potentiodynamischen Polarisationsversuchen war eine z.T. sehr deutliche Differenzierung der unterschiedlichen Werkstoffe hinsichtlich ihres Korrosionsverhaltens möglich. Typische Verläufe von Stromdichte-Potentialkurven für die verschiedenen Werkstoffe aus diesen Messungen verdeutlichen dies (Abb. 54). Das Auswertungskriterium von 0,01 mA/cm^2 für das kritische Lochkorrosionspotential E_{krit} sowie für das Repassivierungspotential E_{Rep} ist als rote Linie im Diagramm dargestellt.

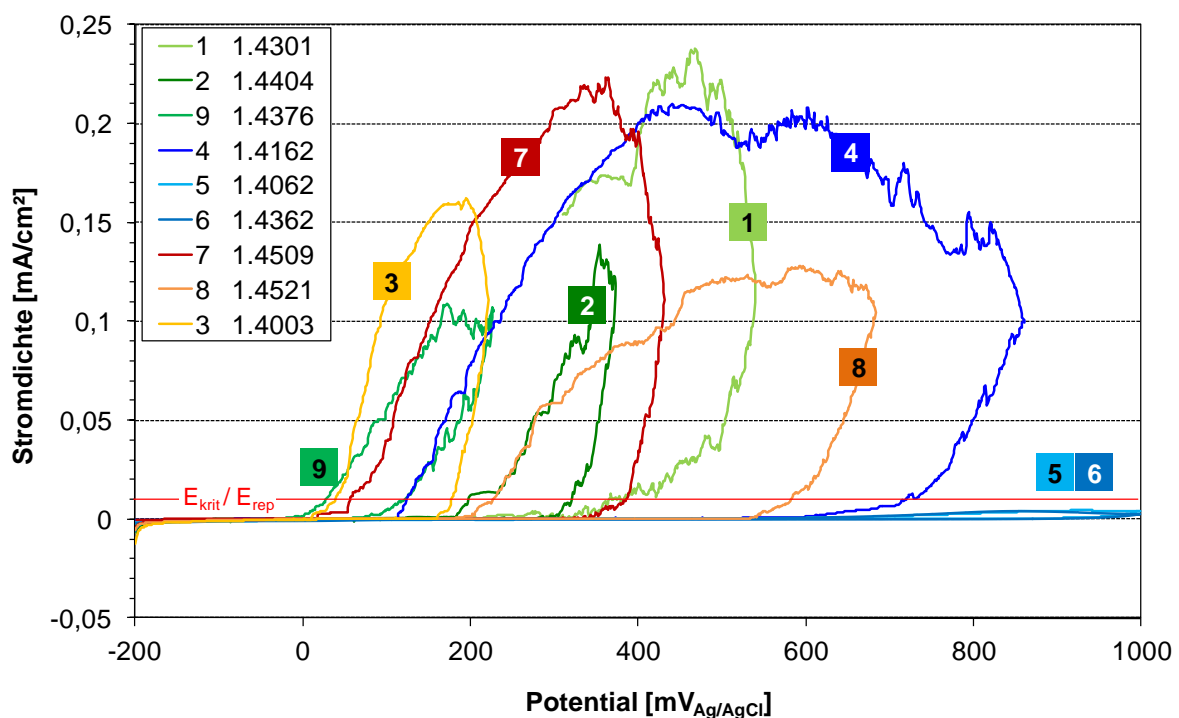


Abb. 54: Typische Stromdichte-Potentialkurven aus potentiodynamischen Versuchen; Oberflächenausführung W; pH 4,5 + 3000 mg Cl/l; Prüftemperatur 20 °C

In Abbildung 55 ist der Temperatureinfluss auf die Lage der kritischen Lochkorrosionspotentiale E_{krit} der Werkstoffe in Oberflächenausführung W dargestellt. Hier konnten für die drei Duplexstähle regelmäßig die positivsten kritischen Lochkorrosionspotentiale ermittelt werden. Gleichzeitig war für die Werkstoffgruppe der Duplexstähle ein signifikanter Temperatureinfluss bezüglich der kritischen Lochkorrosionspotentiale feststellbar. Während bei Temperaturen von 20-30 °C noch überragende Kennwerte festgestellt werden, verringert sich bei Temperaturen >50 °C ihr Abstand zu den anderen Werkstoffen signifikant. Der molybdänlegierte Standardaustenit 1.4404 zeigte unerwartet niedrige kritische Lochkorrosionspotentiale und konnte die erwartete gute Korrosionsbeständigkeit nicht vorweisen. Er lag etwa teilweise noch unterhalb der Werte für den molybdänfreien Standardaustenit 1.4301. Der Manganaustenit 1.4376 wies sehr negative E_{krit} auf und lag nur bei Werten vergleichbar mit dem Ferrit 1.4003. Der Temperatureinfluss fällt bei den austenitischen Werkstoffen im Vergleich zu den Duplexstählen hingegen moderat aus. Für den Werkstoff 1.4301 beispielsweise ist innerhalb des Prüftemperaturbereichs zwischen 20 und 70 °C ein Potentialabfall des E_{krit} von nur 180 mV vorhanden. Die ferritischen Werkstoffe weisen im Vergleich zu den Duplexstählen ebenfalls einen nur geringen Temperatureinfluss in Bezug auf die kritischen Lochkorrosionspotentiale auf. Die ermittelten E_{krit} -Werte des Ferrits 1.4509 waren mit den Standardausteniten vergleichbar. Für den molybdänlegierten Ferrit 1.4521 konnten bei 20 °C nach den Duplexwerkstoffen die besten kritischen Lochkorrosionspotentiale ermittelt werden, bei hohen Temperaturen ≥ 50 °C lagen sie z.T. sogar noch etwas positiver als die der Duplexstähle.

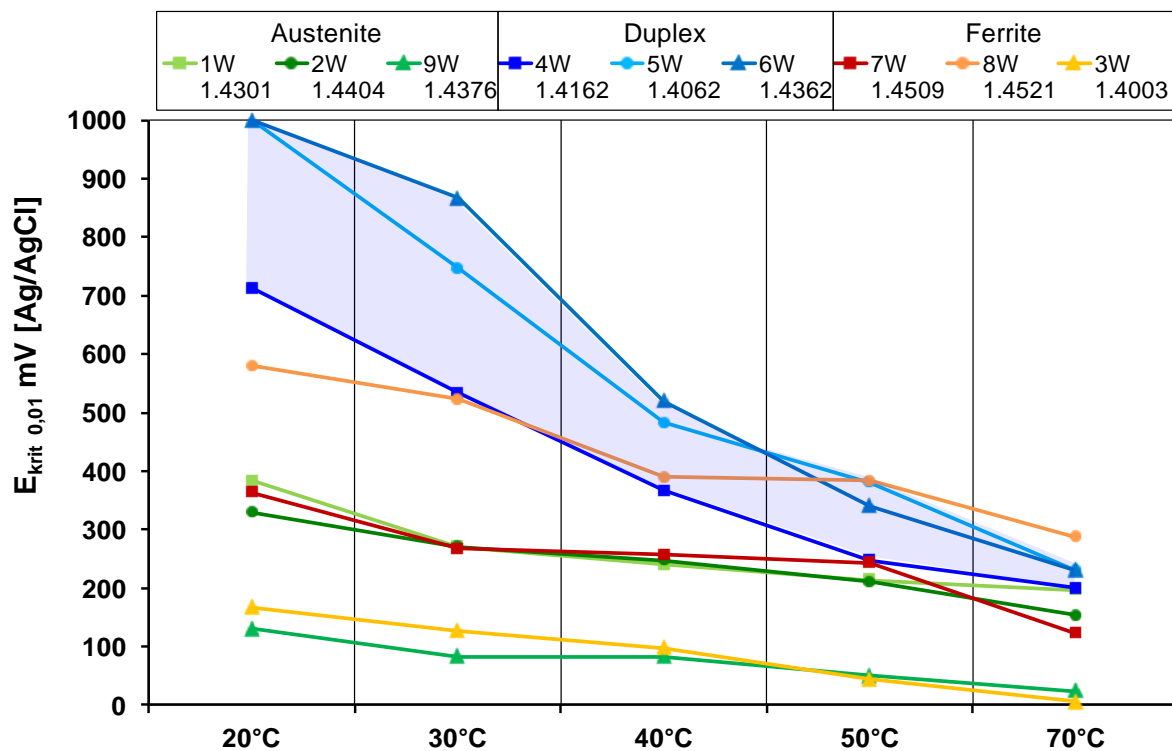


Abb. 55: Einfluss der Temperatur auf die kritischen Lochkorrosionspotentiale; Oberflächenausführung W ; pH 4,5 + 3000 mg Cl/l; Mittelwerte aus je 3 Einzelmessungen

Der Einfluss der unterschiedlichen Oberflächenausführungen auf die Lage der kritischen Lochkorrosionspotentiale bei 20 °C ist in Abbildung 56 dargestellt. Für die meisten Werkstoffe sind die hier festgestellten Unterschiede eher gering. Bei der Werkstoffgruppe der Austenite konnten beim Werkstoff 1.4301 sowie beim Manganaustenit 1.4376 in der elektropolierten Oberflächenausführung eine Verbesserung des kritischen Lochkorrosionspotentials um ca. 150 mV ermittelt werden. Der molybdänlegierte Standardaustenit 1.4404 blieb auch in den verschiedenen Oberflächenausführungen deutlich unterhalb der zu erwartenden Kennwerte. Für den Duplexwerkstoff 1.4362 konnte in keiner Oberflächenausführung ein kritisches Lochkorrosionspotential E_{krit} ermittelt werden, er war unter den gewählten Prüfbedingungen völlig korrosionsbeständig. Auch der Duplexstahl 1.4062 erreichte in den Oberflächenausführungen Walzoberfläche *W* und Trockenschliff *TS* das kritische Lochkorrosionspotential nicht und bei Glasperlen gestrahlter *GP* und elektropolierter *EP* Oberflächenausführung erst bei sehr hohen Potentialwerten von +830 bzw. +960 mV_{Ag/AgCl}. Nur die verbindungsgeschweißten Proben wiesen mit +720 mV_{Ag/AgCl} ein etwas niedrigeres E_{krit} auf.

Für die ferritischen Werkstoffe konnte jeweils für die elektropolierte Ausführungsvariante eine Steigerung des E_{krit} festgestellt werden. Der Einfluss der anderen Ausführungsvarianten war eher moderat. Der Werkstoff 1.4509 hat in den Oberflächenausführungen hier ein nahezu identisches Korrosionsverhalten wie der Standardaustenit 1.4301. Positive E_{krit} Werte um +600 mV_{Ag/AgCl} konnten für den molybdänlegierten Ferrit 1.4521 ermittelt werden. Der Ferrit 1.4003 sowie der Manganaustenit 1.4376 zeigten mit Werten um +150 mV_{Ag/AgCl} die niedrigsten kritischen Lochkorrosionspotentiale.

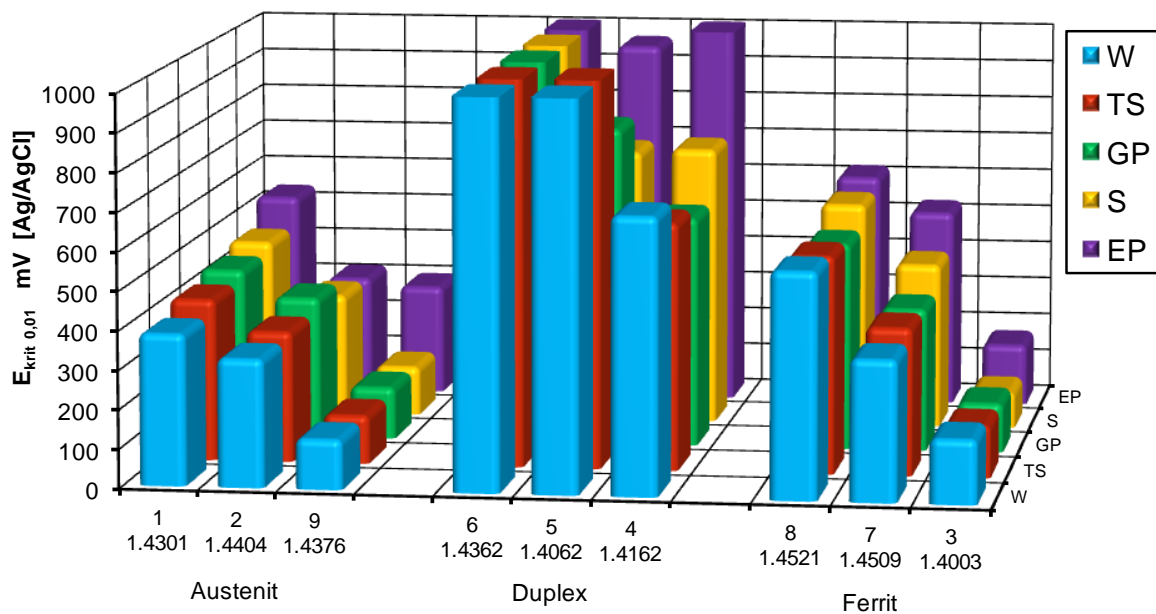


Abb. 56: Einfluss der Oberflächenausführung auf die kritischen Lochkorrosionspotentiale; Prüftemperatur 20 °C; pH 4,5 + 3000 mg Cl/l; Mittelwerte aus je 3 Einzelmessungen

Im Bezug auf die Repassivierungspotentiale war der Temperatureinfluss für die Werkstoffe recht ähnlich. Der für die Duplexwerkstoffe festgestellte deutliche Temperatureinfluss auf das kritische Lochkorrosionspotential, wurde bei den Repassivierungspotentialen nicht festge-

stellt (Abb. 57). Bei den Prüftemperaturen von 20 und 30 °C wurde für die zwei Duplexstähle 1.4062 und 1.4362 kein kritisches Lochkorrosionspotential und somit auch kein Repassivierungspotential ermittelt. Für den molybdänlegierten Standardaustenit 1.4404 konnte in den meisten Fällen die positivsten E_{Rep} Werte ermittelt werden, wodurch sich hier ein völlig anderes Werkstoffranking ergibt als bei den kritischen Lochkorrosionspotentialen. Bei den beiden ferritischen Werkstoffen 1.4509 und 1.4521 war nach einem Absinken des Repassivierungspotentials bis zur Temperaturstufe 50 °C ein Anstieg des Wertes um 30 bzw. 100 mV bei der Temperaturstufe 70 °C zu beobachten.

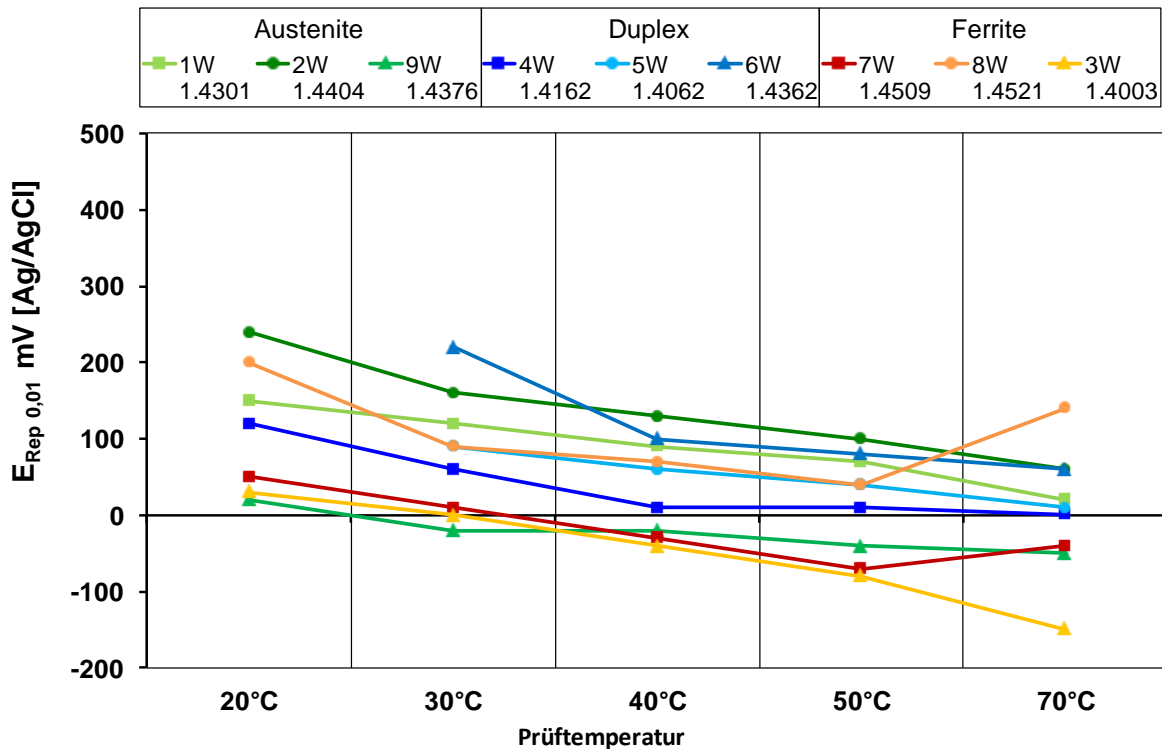


Abb. 57: Einfluss der Temperatur auf die Repassivierungspotentiale; Oberflächenausführung W; pH 4,5 + 3000 mg Cl/l; Mittelwerte aus je 3 Einzelmessungen

Die Repassivierungspotentiale der Werkstoffe in den verschiedenen Oberflächenvarianten sind in Abbildung 58 dargestellt. Ein genereller Einfluss der Oberflächenausführung auf die Repassivierungspotentiale war nicht feststellbar. Der Standardaustenit 1.4301 zeigte in allen Varianten Werte um $+150 \text{ mV}_{Ag/AgCl}$. Beim molybdänhaltigen Standardaustenit 1.4404 konnten etwas positivere Werte um $+240 \text{ mV}_{Ag/AgCl}$ ermittelt werden. Für den Manganausteniten 1.4376 konnten mit $+20 \text{ mV}_{Ag/AgCl}$ die geringsten E_{Rep} ermittelt werden, vergleichbar mit den Werten der zwei ferritischen Werkstoffe 1.4509 und 1.4003. Der molybdänhaltige Ferrit 1.4521 lag mit dem 1.4404 in vergleichbaren Wertebereichen, hier war nur die geschweißte Ausführung mit $+80 \text{ mV}_{Ag/AgCl}$ signifikant negativer. Für viele Oberflächenausführungen der Duplexstähle konnten keine Repassivierungspotentiale bestimmt werden, da diese kein kritisches Lochkorrosionspotential bei den gewählten Prüfbedingungen aufwiesen. Diese sind in der Abbildung 58 transparent dargestellt. Beim manganlegierten Duplex 1.4162 lagen die E_{Rep} leicht unterhalb der Werte des austenitischen Standardwerkstoffes 1.4301 mit Ausnah-

me der elektropolierten Ausführung *EP*, die korrosionsfrei blieb. Der Duplexwerkstoff 1.4062 zeigte in Ausführung *GP* und *S* leicht positivere Werte als der molybdänhaltige Standardaustenit 1.4404. Bei Oberflächenvariante *EP* konnte mit knapp +500 mV_{Ag/AgCl} ein sehr positives Repassivierungspotential ermittelt werden und bei den Ausführungen *W* und *TS* blieb er korrosionsfrei.

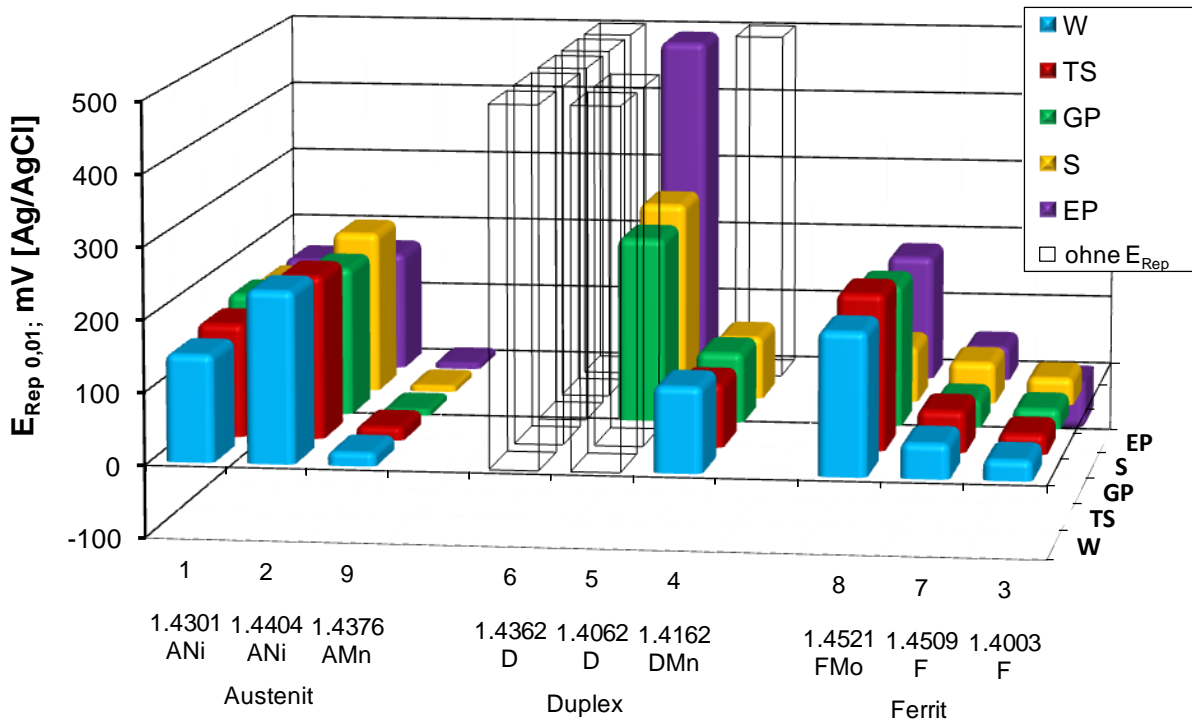


Abb. 58: Einfluss der Oberflächenausführung auf die Repassivierungspotentiale; Prüftemperatur 20 °C; pH 4,5 + 3000 mg Cl/l; Mittelwerte aus je 3 Einzelmessungen

4.3.2 Spaltkorrosionsversuche ^(BAM)

Die ermittelten Spaltkorrosionspotentiale sind in Abbildung 59 dargestellt und lagen für alle Werkstoffe z.T. signifikant negativer als die entsprechenden kritischen Lochkorrosionspotentiale. Für die Werkstoffgruppe der Duplexstähle war die Differenz zwischen E_{krit} und E_{Spalt} mit 250-300 mV am größten, obgleich die positivsten Spaltkorrosionspotentiale im Vergleich zu den anderen Werkstoffen ermittelt werden konnten. Für die Werkstoffe 1.4362 und 1.4062 wurden mit +750 bzw. +700 mV_{Ag/AgCl} die besten Kennwerte bestimmt. Der manganlegierte Duplex 1.4162 lag mit +450 mV_{Ag/AgCl} deutlich negativer und zeigte vergleichbare Werte wie der molybdänlegierte Ferrit 1.4521 (+400 mV_{Ag/AgCl}). Auch für die ferritischen Werkstoffe war der Spalteinfluss sehr groß und die E_{Spalt} Potentiale lagen zwischen 160 und 180 mV negativer als die entsprechenden E_{krit} . Die Spaltkorrosionspotentiale der molybdänfreien (1.4301) und der molybdänlegierten (1.4404) Standardaustenite lagen 90 bzw. 130 mV negativer als die entsprechenden E_{krit} . Die E_{Spalt} Werte für den Werkstoff 1.4404 lagen mit +200 mV_{Ag/AgCl} weit unterhalb der Erwartungen an diesen Werkstoff. Der Manganaustenit 1.4376 zeigte im Vergleich zum kritischen Lochkorrosionspotential keine deutlich negativeren Spaltkorrosi-

onspotentiale, der Unterschied betrug hier lediglich 20 mV, jedoch konnte mit $+150 \text{ mV}_{\text{Ag/AgCl}}$ nur ein ohnehin recht negatives Spaltkorrosionspotential ermittelt werden.

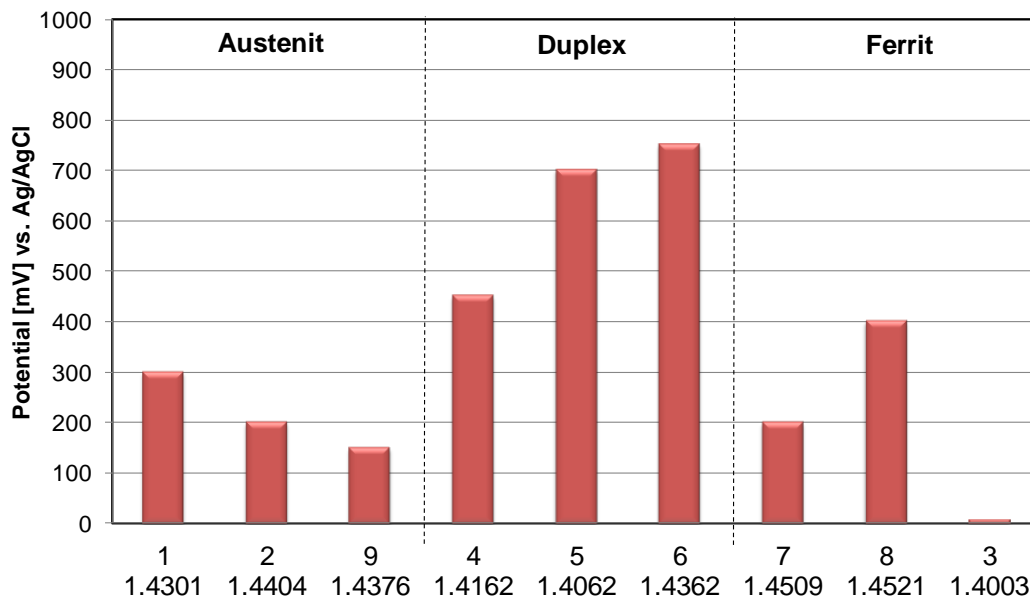


Abb. 59: Spaltkorrosionspotentiale E_{Spalt} aus potentiostatischen Stufenversuchen; Prüftemperatur $20 \text{ }^\circ\text{C}$; pH 4,5 + 3000 mg Cl/l; Mittelwerte aus je 3 Einzelmessungen

5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Entwicklung der Legierungszuschläge in den letzten 9 Jahren für die im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten Stähle ist in Abbildung 60 dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die enormen Preisschwankungen bei den austenitischen Werkstoffen 1.4301, 1.4404 und 1.4376, die nahezu identische Kurvenverläufe zeigen. Das Preisniveau zum jeweiligen Zeitpunkt wird dabei vorwiegend von den Legierungsbestandteilen Nickel und Molybdän bestimmt. Die Legierungszuschläge für den Duplexwerkstoff 1.4362 wurden erst ab April 2009 und für die Duplexwerkstoffe 1.4162 und 1.4062 erst seit Januar 2011 gelistet. Sie liegen deutlich unter dem Niveau der Standardaustenite und sind bzgl. der Legierungszuschläge aktuell im Schnitt 500 € preiswerter. Die Ferrite 1.4509 und 1.4003 liegen bedingt durch den fehlenden Nickelanteil in etwa auf demselben niedrigen Preisniveau und haben auch nahezu identische Kurvenverläufe. Der molybdänlegierte Ferrit 1.4521 schwankt durch den Molybdänanteil stärker.

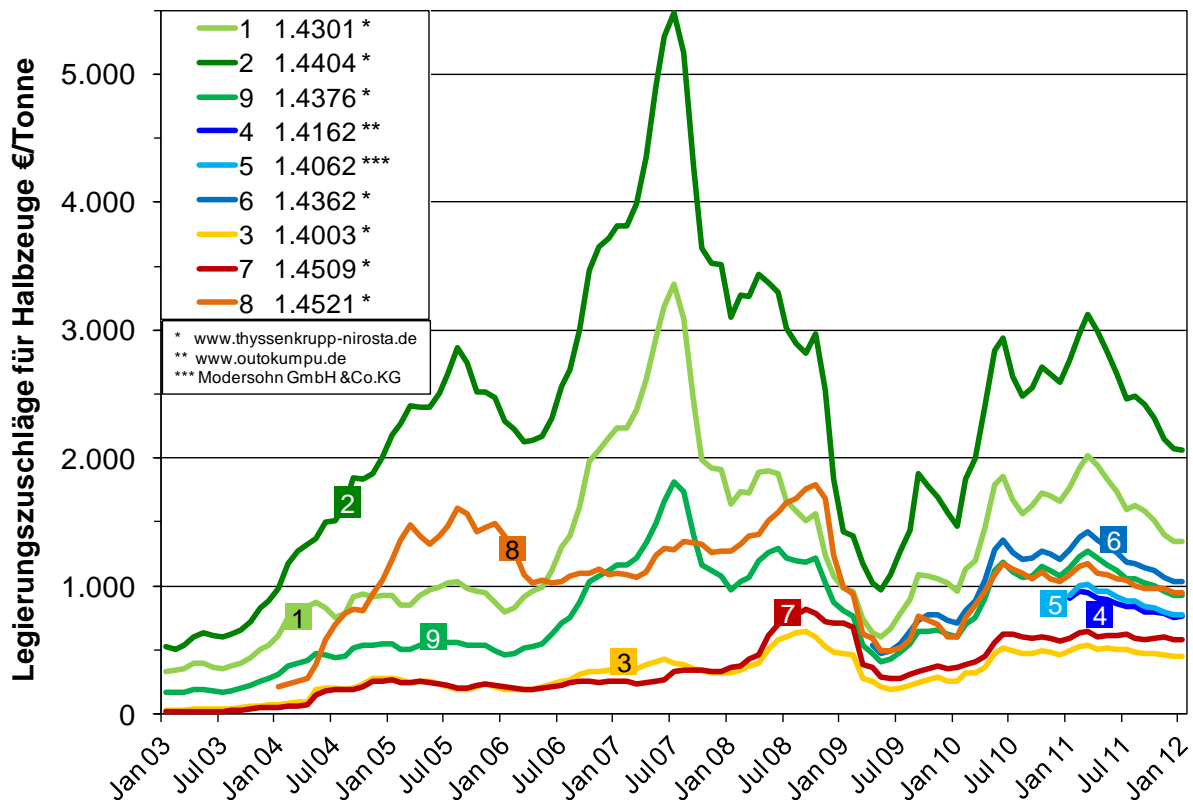


Abb. 60: Entwicklung der Legierungszuschläge in den letzten 9 Jahren

5.1 Marktsituation Lean Duplex ^(HTWG)

Im Rahmen einer Abschlussarbeit an der HTWG Konstanz wurde die Marktsituation von Lean Duplexstählen untersucht. Hierzu wurden 926 Fragebögen an verschiedene Unternehmen verteilt. Mit 259 Rückläufern konnte eine Beteiligungsquote von 28 % erreicht werden. Folgende Themen wurden dabei abgefragt:

- Allgemeine Fragen zur Klassifizierung der Unternehmen
- Kenntnis von Lean Duplex Stählen
- Erfahrungen mit Lean Duplex Stählen
- Gründe, warum Unternehmen Lean Duplex noch nicht eingesetzt haben

Der überwiegende Anteil (85 %) der beantworteten Fragebögen wurde von Unternehmen mit ≤ 200 Mitarbeitern beantwortet (Abb. 61). Die Firmen kamen dabei aus den unterschiedlichsten Branchen, wobei der Metallbau, die Bauindustrie sowie der Maschinen- und Anlagenbau die größten Anteile hatten.

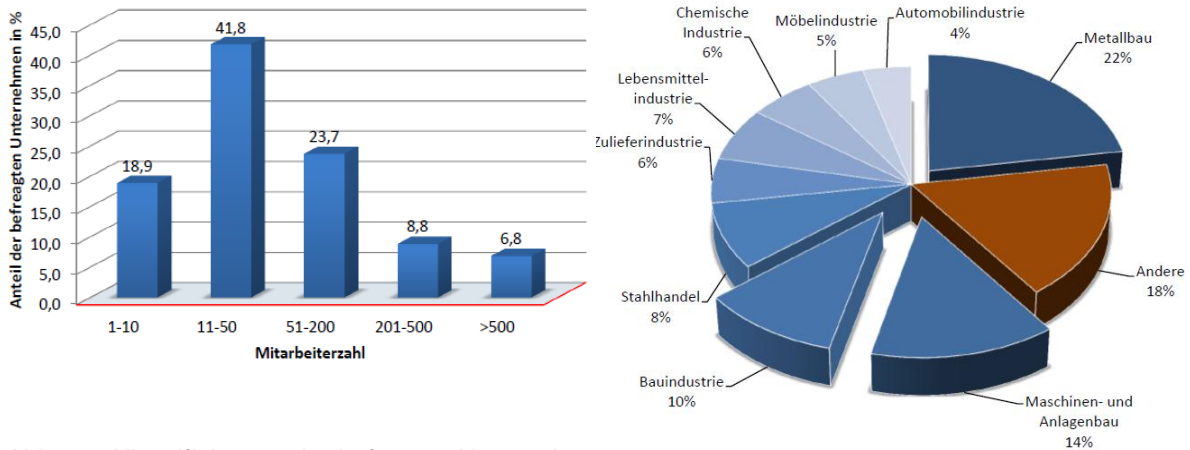


Abb. 61: Klassifizierung der befragten Unternehmen

Etwa die Hälfte der befragten Unternehmen haben bereits von Lean Duplex Stählen gehört, jedoch haben nur etwa 15 % diese Stähle bereits eingesetzt (Abb. 62). Allerdings würden 90 % der Unternehmen die bereits Lean Duplex Stähle eingesetzt haben diese wieder einsetzen bzw. auch weiterempfehlen.

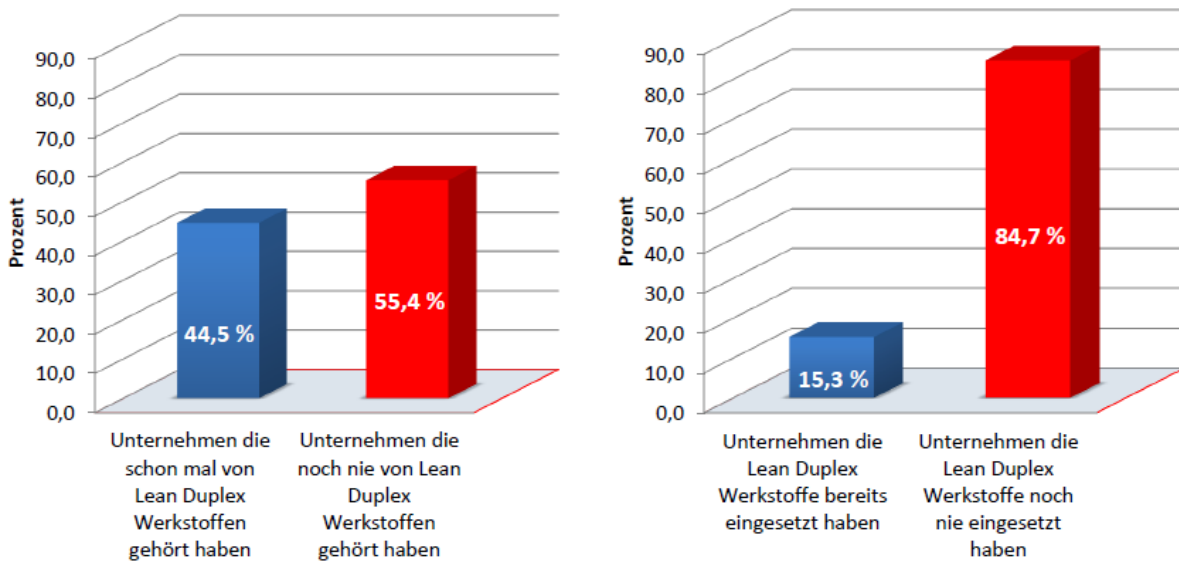


Abb. 62: Auswertung der Fragebögen; Kenntnis, Einsatz von Lean Duplex Stählen

Die Kriterien für die Werkstoffauswahl liegen für die meisten befragten Unternehmen im Preis sowie in der Korrosionsbeständigkeit und der Festigkeit (Abb. 63). Die Verarbeitungseigenschaften und die Verfügbarkeit am Markt sind weniger bedeutsam für die befragten Firmen. Grundsätzlich bereit einen alternativen Werkstoff einzusetzen sind etwas mehr als 60 % der Unternehmen.

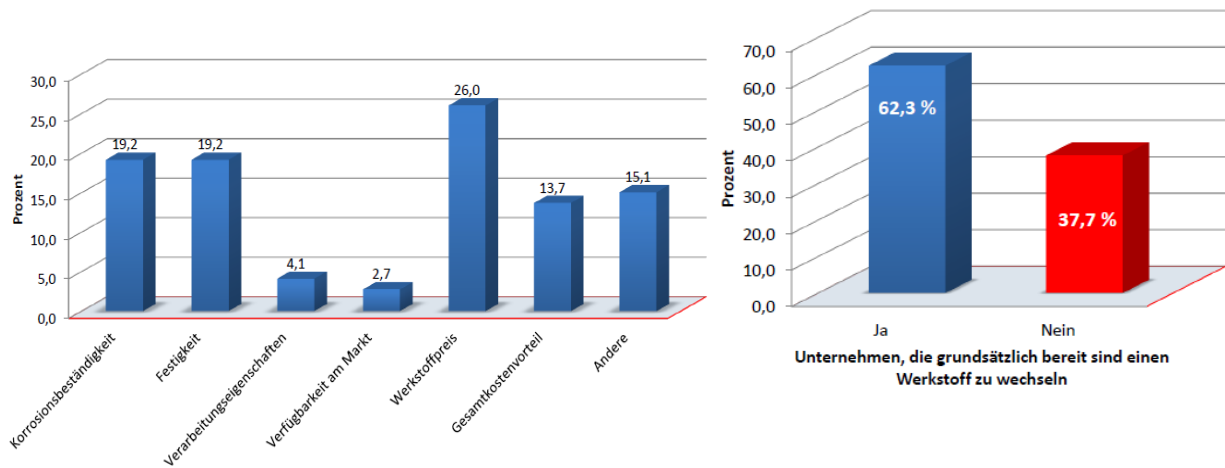


Abb. 63: Auswertung der Fragebögen; Werkstoffauswahlkriterien (links); Wechselbereitschaft (rechts)

Als Gründe, dass Lean Duplex Stähle nicht oder noch nicht eingesetzt wurden, geben die meisten Firmen mangelnde Nachfrage, fehlende Bezugsquellen und fehlendes Verarbeitungs-Knowhow an (Abb. 64).

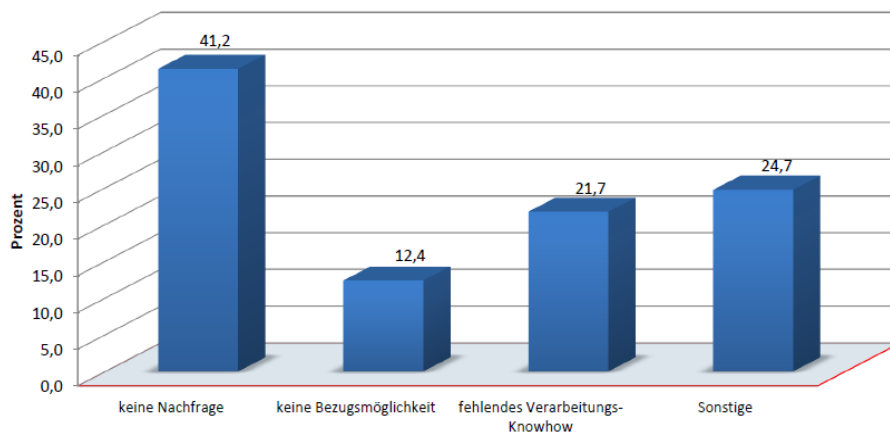


Abb. 64: Auswertung der Fragebögen; Gründe warum Lean Duplex Stähle nicht eingesetzt werden

Für die flächendeckende Markteinführung und –durchdringung von Lean Duplex Stählen wurden im Rahmen der Fragebogenaktion folgende Hindernisse erkannt:

- Informationsdefizit im Markt bzgl. Bekanntheit und Verarbeitung
- Verfügbarkeit
- Trägheit der Unternehmen den Werkstoff zu wechseln
- innerbetrieblicher Materialfluss z.T. schwer realisierbar

6 Diskussion der Ergebnisse

Mit den jetzt vorliegenden Ergebnissen wird deutlich, dass einige der hier untersuchten, nichtrostenden Stähle mit reduziertem Nickelgehalt ein hohes Potenzial bieten, die heute verbreitet eingesetzten, höher nickelhaltigen austenitischen CrNi- und auch CrNiMo-Stähle in verschiedenen Anwendungen zu ersetzen. Der durchgeführte Vergleich der Werkstoffe in verschiedenen Oberflächenausführungen und Verarbeitungszuständen sowie bei Einwirkung unterschiedlicher, praxisrelevanter Medien, erlaubt eine vergleichende Beurteilung des Korrosionsverhaltens der verschiedenen Werkstoffe. Um die Vielfalt der gewonnenen Einzelergebnisse zu erfassen und dem potentiellen Anwender gleichzeitig ein Gesamtbild zum Werkstoffranking unter verschiedenen Einsatzbedingungen zu ermöglichen, wurden die Ergebnisse aller Versuche einer abschließenden Bewertung unterzogen. Hierzu bekamen die Werkstoffe, die im Vergleich zu den anderen Werkstoffen in einer Prüfung das beste Korrosionsverhalten zeigten jeweils 2 Punkte (grüne Markierung), und die Werkstoffe mit dem schlechtesten Korrosionsverhalten in dieser Prüfung 0 Punkte (rote Markierung). Ein dazwischen liegendes Ergebnis wurde mit 1 Punkt bewertet (gelbe Markierung). Der Einfluss der Oberflächenausführung auf das Ergebnis wird bei der Bewertung mit berücksichtigt, kann aber in der Übersicht nicht explizit dargestellt werden. Die so erhaltenen Einzelbewertungen sind in der Tabelle 13 zusammenfassend dargestellt. Dabei wird zwischen den drei großen Versuchskomplexen dieses Vorhabens unterschieden: der Auslagerung in natürlichen Klimaten bzw. unter praktischen Einsatzbedingungen, der Auslagerung in künstlichen Klimaten und den elektrochemischen Untersuchungen.

Beim Vergleich zwischen natürlichen Klimaten bzw. unter praktischen Einsatzbedingungen zeigen sich im Vergleich zu den künstlichen Klimaten einige interessante Unterschiede. So konnte z.B. der ferritische Werkstoff 1.4521 bei den Versuchen in künstlichen Klimaten die Höchstpunktzahl von 10 erreichen, gehörte also in allen Versuchen dieses Komplexes zu den besten Werkstoffen und befindet sich dabei auf etwa gleichem Niveau mit den Duplexwerkstoffen. Unter praktischen Einsatzbedingungen und natürlichen Klimaten zeigte der Werkstoff 1.4521 dagegen deutliche Schwächen und zeigte einen deutlichen Abstand zur Beständigkeit der Duplexwerkstoffe. Hieran wird deutlich, dass die insbesondere auf Kurzzeitprüfungen ausgelegten Prüfungen in künstlichen Klimaten, das Werkstoffverhalten unter praktischen Einsatzbedingungen nicht in jedem Fall ausreichend beschreiben können. Es zeigt, dass erst die Kombination verschiedener Untersuchungen ein vollständiges Bild über das Werkstoffverhalten liefern kann.

Beim Vergleich der Ergebnisse der elektrochemischen Versuche mit den Auslagerungsversuchen fällt insbesondere eine signifikante Abweichung in der Bewertung des Manganaustenits 1.4376 auf. Dieser Werkstoff zeigte in den elektrochemischen Versuchen ein ähnlich ungünstiges Verhalten wie der Werkstoff 1.4003. Während sich diese Einschätzung bei 1.4003 auch in den Auslagerungsversuchen widerspiegelt, ergibt sich für den Werkstoff 1.4376 ein völlig anderes Bild. Sowohl in den künstlichen Klimaten wie in den natürlichen Klimaten bzw. unter praktischen Einsatzbedingungen kann der Werkstoff 1.4376 mit den beiden anderen Vertretern der austenitischen Stähle sehr gut konkurrieren. Auch hier wird

deutlich, dass sich Untersuchungen zur Vergleichbarkeit der Korrosionsbeständigkeit nicht ausschließlich auf eine einzelne Versuchsvariante stützen sollten.

Tab. 13: Zusammenfassende Ergebnismatrix der durchgeführten Versuche

Untersuchungsmethoden		Austenit			Duplex			Ferrit		
		1 1.4301	2 1.4404	9 1.4376	4 1.4162	5 1.4062	6 1.4362	7 1.4509	8 1.4521	3 1.4003
Auslagerung natürliche Klimate	Stadt, freibewittert	2	2	2	2	2	2	1	2	0
	Meer, freibewittert	0	0	1	1	2	1	0	1	0
	Meer, überdacht	1	1	1	2	2	2	0	0	0
	Schwimmhalle	0	1	1	2	2	2	0	1	0
	Lebensmittelindustrie	2	2	0	2	2	2	1	1	1
Summe		5	6	5	9	10	9	2	5	1
Auslagerung künstliche Klimate	Kombinierte Klimaprüfung Salzsprühkammer + Klima	2	1	2	2	2	2	1	2	0
	MgCl ₂ Tropfentest (SpRK)	1	1	0	2	2	2	2	2	2
	Kesternichtest (Cl ⁻ + SO ₂)	1	2	1	1	1	1	0	2	0
	Erde	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Reinigerlösungen	2	1	2	2	2	1	0	2	0
Summe		8	7	7	9	9	8	5	10	4
Elektrochemie	Stromdichte-Potential-Kurven Ekrit < 50°C	1	1	0	2	2	2	1	2	0
	Stromdichte-Potential-Kurven Ekrit > 50°C	1	1	0	1	1	1	1	1	0
	Spaltkorrosionsversuche 20°C	1	0	0	1	2	2	0	1	0
Summe		3	2	0	4	5	5	2	4	0

2 bestes 1 mittleres 0 schlechtes Ergebnis

Die elektrochemischen Korrosionsuntersuchungen zeigten aber auch ein unerwartet schlechtes Verhalten bei dem molybdänlegierten Standardaustenit 1.4404 und bei dem hoch manganhaltigen Stahl 1.4376 (X8CrMnNi19-6-3). Insbesondere das in mehreren Oberflächenzuständen gewonnene Ergebnis, dass der molybdänlegierte Stahl 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2) eine schlechtere Lochkorrosionsbeständigkeit aufweist als der molybdänfreie Standardaustenit 1.4301 (X5CrNi18-10) widerspricht den Erwartungswerten und bedürfen daher einer näheren Betrachtung. In Abbildung 65 sind hierzu typische Stromdichte-Potentialkurven der Werkstoffcharge aus dem Vorhaben mit Werkstoffchargen aus dem BAM Bestand gegenübergestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass die kritischen Lochkorrosi-

onspotentiale der Bestandschargen 200 bis 300 mV positiver liegen, als die Lochkorrosionspotentiale der im Rahmen dieses Vorhabens untersuchten Charge.

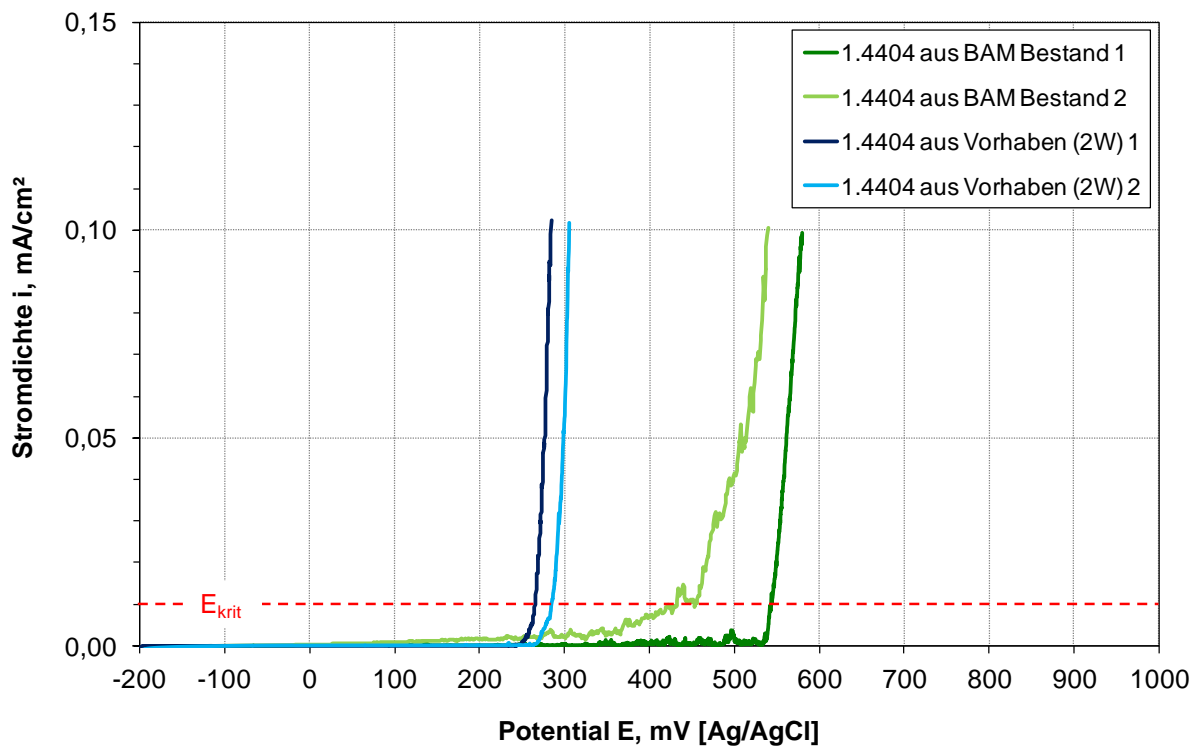


Abb. 65: Stromdichte-Potentialkurven aus potentiodynamischen Versuchen (s. 3.3.1); unterschiedliche Chargen des Werkstoffs 1.4404; pH 4,5 + 3000 mg Cl/l; Prüftemperatur RT 23 °C ±2

Der Grund für dieses ungünstige Abschneiden wird im relativ hohen, grenzwertigen Schwefelgehalt der hier geprüften Werkstoffcharge gesehen. In Tabelle 14 sind Ergebnisse von Funkenemissionsspektroanalysen (FES) der Werkstoffchargen aus dem Vorhaben und aus dem BAM Bestand abgebildet.

Tab. 14: Legierungszusammensetzung Wst. 1.4404 aus FES Analysen und nach Norm; Angaben in [M.-%]

		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
1.4404 (X2CrNiMo17-12-2) nach DIN EN 10088-1	Min	-	-	-	-	-	16,50	2,00	10,00
	Max	0,03	1,00	2,00	0,045	0,015	18,50	2,50	13,00
1.4404 aus BAM Bestand 1		0,03	0,41	0,92	0,03	0,004	16,68	1,87	10,16
1.4404 aus Vorhaben (2W)	2W	0,02	0,53	0,89	0,039	0,013	16,53	1,98	10,52

Über den negativen Einfluss von Sulfiden auf die Lochkorrosionsbeständigkeit wird in der Literatur vielfach berichtet, hierbei spielen nicht nur die Menge an Sulfiden sondern auch deren Form (rundliche oder gestreckte Einschlüsse) und deren Zusammensetzung (Chromsulfide, Mangansulfide, Mischsulfide etc.) eine Rolle. In früheren, sehr umfangreichen

Untersuchungen [7] konnte gezeigt werden, dass auch bei absolut betrachtet niedrigen Schwefelgehalten ein deutlicher Unterschied im Korrosionsverhalten der Werkstoffe in Abhängigkeit von der Höhe des Schwefelgehaltes zu beobachten ist (Abb. 66).

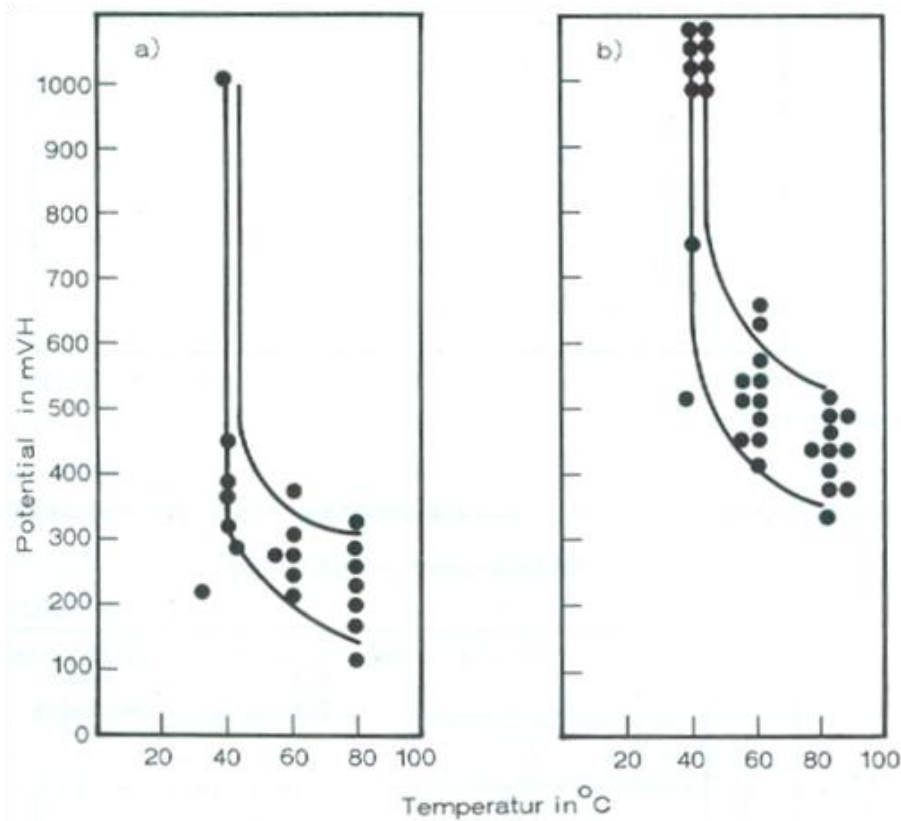


Abb. 66: Einfluss des Schwefelgehaltes auf das kritische Lochkorrosionspotential eines hochlegierten austenitischen nichtrostenden Stahl 1.4539 (X1NiCrMoCu25-20-5)
a) Schwefelgehalt: 0.010%, b) Schwefelgehalt kleiner 0,003 %, nach [7]

Zur Untersuchung hinsichtlich Einschlüssen wurden die Proben des Werkstoffs 1.4404 aus dem Vorhaben und aus BAM Bestand 1 im polierten Zustand bei 200-facher Vergrößerung mit dem Rasterelektronenmikroskop der Firma Zeiss, Typ EVO 40 XVP, unter Verwendung der zur Partikelanalyse konzipierten Software SMART PI automatisch abgefahren und ausgewertet. Durch Verwendung eines Vier-Quadranten-Rückstreuelektronendetektors (QBSD) wurden die unterschiedlichen Einschlusstypen durch den dichtespezifischen Materialkontrast untereinander und gegenüber dem Matrixwerkstoff unterschieden. Die Analyse der einzelnen Einschlüsse erfolgte durch ein EDX-System der Firma Bruker AXS, Typ Quantax QX2, Detektortyp X Flash 3001. Durch die EDX-Analyse erfolgte letztlich die Zuordnung der Einschlüsse. Die Vorgaben für die korrekte Zuordnung erfolgte durch Anpassung einer entsprechend eingerichteten Datenbank. Erfasst wurden Einschlüsse ab einer größten Längenausdehnung in einer Richtung (Ferret Max) von $3\mu\text{m}$ bis $88\mu\text{m}$. Die Obergrenze wurde aufgrund der vorliegenden Gegebenheiten der Proben gewählt. Zur Auswertung wurden zwischen 88 und 200 Bildfelder je Probe abgescannt. Ein Bildfeld hat bei der gewählten Vergrößerung eine Fläche von $0,258\text{mm}^2$.

Im vorliegenden Fall zeigten die Sulfideinschlüsse auch noch einen hohen Mangangehalt (Abb. 67). Mit abnehmenden Chromgehalten in den Sulfiden werden diese leichter aufgelöst und führen zu einer erhöhten Stromdichte die bei der gewählten Untersuchungsmethodik als Indikator für die Lochkorrosionsbeständigkeit gewertet wird.

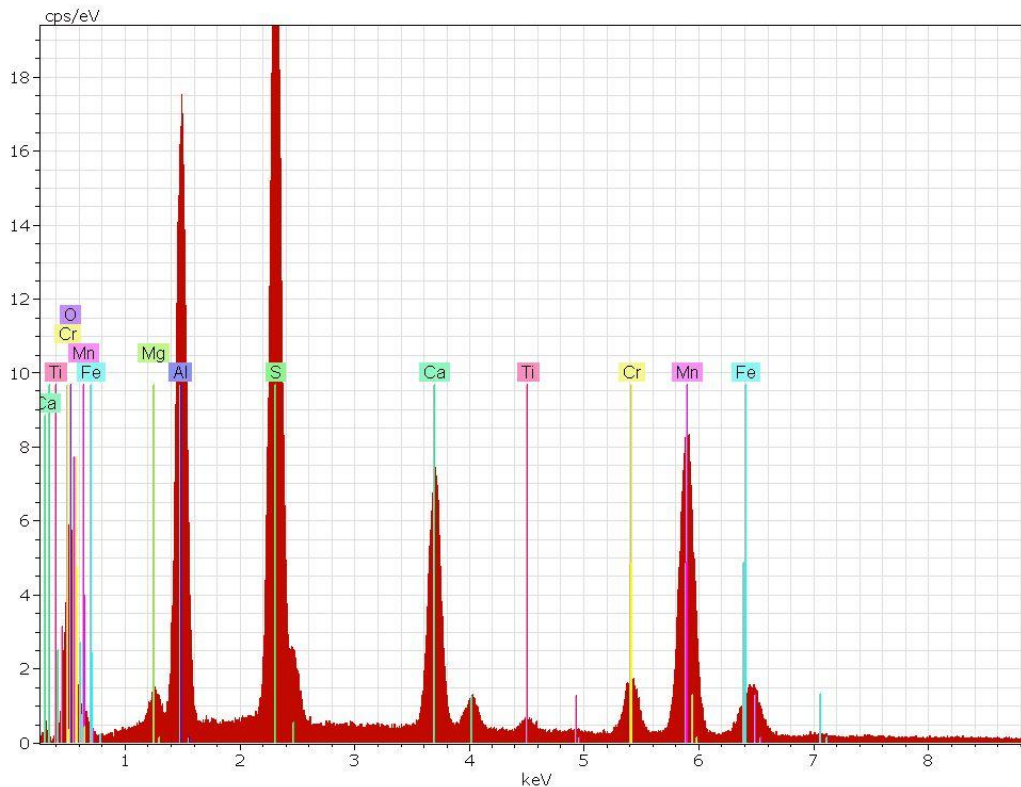


Abb. 67: EDX-Elementenspektrum eines sulfidisch/oxidischen Einschlusses in den Stahl 1.4404 aus dem Vorhaben, Bez. 2W

Das Ergebnis der gesamten Einschlussanalyse, dargestellt in Tabelle 15, zeigt, dass bei der im Projekt eingesetzten Materialcharge in Längsrichtung Mangansulfide angezeigt werden, während dies bei der Charge, die sich im elektrochemischen Versuch deutlich besser verhalten hat kein Flächenanteil an Mangansulfiden nachgewiesen werden konnte. Hier ist zu bemerken, dass die Sulfide von dem automatisiert arbeitendem System erst als solche erkannt werden, wenn ihre Größe in Relation zu dem bei der Materialanalyse angeregten Volumen steht, daher kann es zu dem Anzeigewert 0 kommen obwohl der Stahl geringste Sulfideinschlüsse enthält. Betrachtet man die Einzelergebnisse der beiden untersuchten Werkstoffchargen (Abb. 68 und 69), so zeigt sich deutlich, dass nur bei der im Vorhaben eingesetzten Charge größere und länglich ausgestreckte Mangansulfide vorliegen, diese dürften für die in den elektrochemischen Untersuchungen festgestellten niedrigeren kritischen Lochkorrosionspotentialen verantwortlich sein.

Tab. 15: Zusammenfassung der Ergebnisse der Einschlussanalyse

Material	E _{krit} [mV _{Ag/AgCl}] (s. Abb. 65)	Ebene zur Walz- richtung	Ø Einschluss- länge [µm]	Ø Einschluss- fläche [µm ²]	Einschlusstyp [Anzahl/mm ²]			
					Al ₂ O ₃	Ti-Typ	SMn	CaSAI
1.4404 aus BAM Bestand 1	540	Längs	5,4	15,0	8,1	0,6	0	0
		Quer	5,2	16,2	8,9	0,3	0	0
1.4404 aus Vor- haben (2W)	275	Längs	5,4	24,7	1,5	0,1	0,9	9,3
		Quer	6,9	14,7	1,4	0,2	0	8,5

Ergebnisübersicht: Einschlusstyp gemäss EDX-Spezifikation

Grössenklassen	Anzahl	Al ₂ O ₃	CaSAI	SMn	Ti-Typ	Unclassified
1 - Einschlüsse längs 3 - 5µm	307	250	0	0	19	38
1 - Einschlüsse globular 3 - 5µm	57	44	0	0	4	9
2 - Einschlüsse längs 5.6 - 11µm	128	106	0	0	6	16
4 - Einschlüsse längs 22.1 - 44µm	6	0	0	0	0	6
3 - Einschlüsse längs 11.1 - 22µm	16	13	0	0	0	3
<None>	5	4	0	0	1	0
2 - Einschlüsse globular 5.6 - 11µm	3	3	0	0	0	0
Anzahl	522	420	0	0	30	72

Abb. 68: Einschlussanalyse am 1.4404 aus BAM-Bestand 1

Ergebnisübersicht: Einschlusstyp gemäss EDX-Spezifikation

Grössenklassen	Anzahl	Al ₂ O ₃	CaSAI	SMn	Ti-Typ	Unclassified	Not Analysed
1 - Einschlüsse längs 3 - 5µm	274	27	124	17	2	103	1
2 - Einschlüsse längs 5.6 - 11µm	95	6	42	6	1	40	0
1 - Einschlüsse globular 3 - 5µm	99	8	67	2	0	22	0
2 - Einschlüsse globular 5.6 - 11µm	26	1	15	0	0	10	0
3 - Einschlüsse längs 11.1 - 22µm	7	0	4	0	0	3	0
<None>	4	0	2	0	0	2	0
4 - Einschlüsse längs 22.1 - 44µm	2	0	0	0	0	2	0
6 - Einschlüsse längs 88.1 - 176µm	1	0	0	0	0	1	0
Anzahl	508	42	254	25	3	183	1

Abb. 69: Einschlussanalyse am 1.4404 aus dem Vorhaben, Bez. 2W

Insgesamt ist einzuschätzen, dass insbesondere die Lean-Duplex-Stähle deutliche Vorteile gegenüber den Standardausteniten bieten: bei moderaten Temperaturen ist ihre Beständigkeit gegen chloridinduzierte Lochkorrosion höher, als die der heute überwiegend eingesetzten austenitischen CrNi-Stähle, sie zeigen keine Anfälligkeit gegenüber chloridinduzierter Spannungsrissskorrosion und sie haben eine deutlich höhere Grundfestigkeit als die austenitische Werkstoffe. Dies ermöglicht insbesondere in Anwendungen, bei denen Lasten abgetragen werden, die Möglichkeit der Querschnittsabminderung, fördert so den Leichtbau und führt zu Materialeinsparungen und damit einer Ressourcenschonung bei den eingesetzten Rohstoffen. Die vorliegenden systematischen Ergebnisse deuten darauf hin, dass ein hoher Chromgehalt eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit durch eine hohe Stabilität der Passivschichten und deren schnelle Reproduktion sicherstellt. Für eine gute Repassivierung sind nach Auslösung von Lochkorrosion dann die Elemente Nickel und auch Molybdän von Be-

deutung. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass bei der angewandten elektrochemischen Untersuchungsmethode der Duplexstahl 1.4362 (X2CrNiN23-4) bis zu einer Temperatur von 50 °C ein besseres Repassivierungsverhalten zeigt als der austenitische CrNiMo-Stahl 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2). Erst bei höheren Einsatztemperaturen ändern sich die Verhältnisse zugunsten des austenitischen Stahles. Damit ist die Wirksamkeit der höheren Chromgehalte in den Duplexstählen bei Einsatztemperaturen bis 50 °C von größerer Bedeutung für die Sicherstellung des Korrosionsschutzes als die Wirkung des Molybdäns. Dort wo es erst gar nicht zu Initiierung von örtlichen Korrosionserscheinungen kommt braucht es weder Molybdän für die Repassivierung von Defektstellen noch Nickel, um die mit der örtlichen Korrosion einhergehende pH-Wertabsenkung zu beherrschen. Unter Berücksichtigung der Kosten der beiden letztgenannten Legierungselemente ist die Möglichkeit der vollständigen oder teilweisen Substitution der Elemente Molybdän und Nickel durch höhere Chromgehalte unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine wichtige Erkenntnis dieses Vorhabens.

Literatur

- [1] Deutsche Edelstahlwerke
<http://www.dew-stahl.com/produkte/legierungszuschlaege/rsh-staehle.html>
- [2] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-30.3-6:
Erzeugnisse, Verbindungsmittel und Bauteile aus nichtrostenden Stählen;
DIBt, 20. April 2009, Änderungsbescheid vom 01.05.2011
- [3] DIN EN 10088-1: 2005-09:
Nichtrostende Stähle, Teil 3: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle.
- [4] DIN EN ISO 8565: 1995:
Metalle und Legierungen - Korrosionsversuche in der Atmosphäre - Allgemeine Anforderungen an Freibewitterungsversuche.
- [5] DIN EN ISO 10289: 2001:
Verfahren zur Korrosionsprüfung von metallischen und anderen anorganischen Überzügen auf metallischen Grundwerkstoffen - Bewertung der Proben und Erzeugnisse nach einer Korrosionsprüfung.
- [6] DIN EN ISO 9227: 2006:
Korrosionsprüfungen in künstlichen Atmosphären – Salzsprühnebelprüfungen
- [7] *N. Arlt; H.-J. Fleischer; R. Grundmann; P. Gumpel:*
Beispiele für Entwicklungstrends auf dem Gebiet der nichtrostenden Stähle; Thyssen Edelst. Techn. Ber. 14 (1988) 1, S. 3-11

7 Gegenüberstellung der Ergebnisse zu den vorgegebenen Zielen

Durch die durchgeführten systematischen Labor- und Auslagerungsuntersuchungen ist es möglich 7 Alternativwerkstoffe hinsichtlich unterschiedlichster Anwendungen untereinander und im Bezug auf zwei bekannte austenitische Standardwerkstoffe (1.4301, 1.4404) zu vergleichen. Die gleichzeitige Untersuchung von 5 verschiedenen Oberflächenausführungen der jeweiligen Werkstoffe ermöglicht zudem branchenspezifische Besonderheiten beim Werkstoffvergleich zu berücksichtigen.

Noch innerhalb der Laufzeit dieses Vorhabens wurde für Verankerungsmittel im Bauwesen der Fa. Modersohn GmbH & Co. KG vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für den Werkstoff 1.4062 erteilt. Hierdurch wird deutlich wie wertvoll die im Rahmen des Forschungsvorhabens gewonnen Erkenntnisse für die Praxis sind und das diese aufgrund der wirtschaftlichen Erfordernisse ebenso zeitnah umgesetzt werden.

Die Ergebnisse wurden für den projektbegleitenden Ausschuss aufbereitet und innerhalb von vier Sitzungen vorgestellt. Der Wissenstransfer zu den Zielgruppen, insbesondere in den Bereich des Metallbaus erfolgte durch zahlreiche Vorträge im Bereich der Landesverbände, der Metallinnungen, der Handwerkskammern und Weiterbildungsseminaren der Informationsstelle Edelstahl Rostfrei sowie durch Veröffentlichung in Tagungsbänden. Im Folgenden sind die Veröffentlichungen explizit aufgeführt:

Veröffentlichungen:

- 1) Burkert, A., Burkert, A., Fischer, J.:
Legierungsgehalt oder Oberfläche - Was bestimmt die Beständigkeit nichtrostender Stähle?
Tagungsband: 9. Tagung Korrosionsschutz in der maritimen Technik (2010), 7-18; Hrsg.: Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V. (GfKORR)
- 2) Gümpel, P., Burkert, A.:
Application of duplex stainless steels in civil engineering
Tagungsband: 8th Duplex stainless steel - International conference & exhibition (2010), 1143-1156; EDP Sciences, ISBN 978-2-7598-0672-0
- 3) Gümpel, P., Leu, F., Burkert, A., Lehmann, J.:
Corrosion resistance of lean alloy alternatives for 300 series stainless steels
Tagungsband: 7th European stainless steel conference - science and market (Proceedings) (2011) Applications / No. 53, 1-15; Hrsg.: Associazione Italiana di Metallurgia (AIM), ISBN 978-88-85298-84-2

Vorträge:

- 1) Burkert, A., Lehmann, J., Burkert, A.:
Legierungsgehalt oder Oberfläche - Was bestimmt die Beständigkeit nichtrostender Stähle? ; 9. Tagung Korrosionsschutz in der maritimen Technik, Hamburg, 28.01.2010
- 2) Burkert, A., Lehmann, J., Burkert, A.:
Legierungsgehalt oder Oberfläche - Was bestimmt die Beständigkeit nichtrostender Stähle? ; Tagung der Metall-Innung BW, Fa. Zweygart, Gärtringen, 27.05.2010
- 3) Gümpel, P., Burkert, A.:
Application of Duplex Stainless Steels in Civil Engineering
Duplex Stainless Steels Conference & Exhibition 2010; Beaune, France, 13.-15.10.2010
- 4) Lehmann, J. (Vortragender), Burkert, A.:
Neue Ansätze zur Werkstoffauswahl Z-30.3-6 - Alternativen im Bereich Edelstahl Rostfrei
Wissenschaft trifft Handwerk -Neue Werkstoffe und Verfahren auf der Baustelle
Bildungs- und Technologiezentrum der HWK zu Leipzig, 15.03.2011
- 5) Burkert, A. (Vortragender), Burkert, A., Lehmann, J.:
Legierungsgehalt oder Oberfläche - Was bestimmt die Beständigkeit nichtrostender Stähle?; Praxistag Werkstoffe, Netzwerk, Werkstoffkompetenz NRW, Siegen 21.09.2010
- 4) Gümpel, P., Leu, F., Burkert, A., Lehmann, J.:
Corrosion resistance of lean alloy alternatives for 300 series stainless steels
7th European stainless steel conference - science and market, Associazione Italiana di Metallurgia (AIM), Como (Italy) 21.-23.11.2011
- 6) Burkert, A., Lehmann, J., Burkert, A.:
Alternative Edelstahlgüten zu den klassischen nichtrostenden Austeniten
Kompetenzzentren Edelstahl-Rostfrei-Verarbeitung, Kursleiter-Fortbildung 2011, Tuttlingen, 26.- 27.09.2011
- 7) Burkert, A., Lehmann, J., Fischer, J.:
Neue Werkstoffe - Eigenschaften und Einsatzgrenzen
MACH1 Weiterbildung - Neue Werkstoffe - Edelstahl Rostfrei; Herford, 18.10.2011
- 8) Burkert, A., Lehmann, J., Fischer, J.:
Korrosionsverhalten nichtrostender Stähle - Einfluss von Legierungsgehalt, Verarbeitung und Oberflächenausführung
Böhler-Welding Schweiss-Tagung, Giswil, Schweiz, 03.11.2011 bis 04.11.2011
- 9) Burkert, A., Lehmann, J.:
Alternative Edelstahlgüten zu den klassischen nichtrostenden Austeniten
Sitzung des Marketingausschusses der Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, Düsseldorf, 24.11.2011

8 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

8.1 Durchgeführte und geplante spezifische Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Vorhabens:

Maßnahme A	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss PA	Die Forschungsergebnisse werden fortlaufend im PA ausführlich diskutiert	<i>A1 Vorstellung des Projektes, Diskussion der geplanten Arbeiten</i>	17.07.2009
		<i>A2 Vorstellung des Projektstandes und Diskussion zur weiteren Vorgehensweise</i>	25.03.2010
		<i>A3 Vorstellung des Projektstandes und Diskussion zur weiteren Vorgehensweise</i>	22.10.2010
		<i>A4 Abschlusspräsentation und Diskussion aller erzielter Ergebnisse</i>	20.10.2011
Maßnahme B	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Weiterbildung/ Transfer der Projektergebnisse in die Industrie über Fachveranstaltungen	Weiterbildung von Mitarbeitern der kmU ohne eigene Forschungskapazitäten	<i>B1 Vortrag im Rahmen einer Fachveranstaltung „Korrosionsschutz in der maritimen Technik“</i>	28.01.2010
		<i>B2 Vortrag Metallbauinnung BW</i>	27.05.2010
		<i>B3 Vortrag im Rahmen einer Fachveranstaltung „Duplex World 2010“</i>	15.10.2010
		<i>B4 Vortrag HWK Leipzig Wissenschaft trifft Handwerk</i>	15.03.2011
		<i>B5 Praktikertagung NRW</i>	21.09.2010
		<i>B4 Vortrag im Rahmen einer Fachtagung „7th European stainless steel conference“</i>	23.09.2011
		<i>B5 Vortrag Kursleiter Fortbildung 2011</i>	26.09.2011
		<i>B8 Vortrag MACH1 Weiterbildung</i>	18.10.2011
Maßnahme C	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Prozessbegleitende Beratung von kmU	Produktentwicklung und –weiterentwicklung, Verfahrensentwicklung	<i>C1 Stellungnahme bzgl. Einsatz alternativer Legierungen in verschiedenen Anwendungsbereichen</i>	03.03.2010
Maßnahme D	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Veröffentlichung	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	<i>D1 Tagungsband zu B2</i>	10/2011
		<i>D2 Tagungsband CD zu B4</i>	10/2011
		D3 Beitrag in Fachzeitschrift Horizonte, eingereicht	I. Quartal 2012

8.2 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme E	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Transfer der Projektergebnisse in die Industrie über Fachveranstaltungen	Weiterbildung von Mitarbeitern der kmU ohne eigene Forschungskapazitäten	E1 Vortrag Schweißtagung Giswil	03.11.2011
		E2 Vortrag ISER Marketing	24.11.2011
		E3 Vortrag HWK Würzburg	15.02.2012
		E4 Vortrag HWK Kaiserslautern	23.02.2012
		E5 Vortrag Metallinnung Gengenbach	24.02.2012

Maßnahme F	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Veröffentlichung	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	D1 Beitrag in Fachzeitschrift (z.B. Werkstoffe und Korrosion)	2012
		D2 Beitrag in branchenspezifischer Zeitschrift (z.B. Fokus rostfrei)	2012

Transfermaßnahme durchgeführt

9 Einsatz von wissenschaftlichem Personal und Geräten mit einem Beschaffungswert über 2.500 €

Der eingesetzte Wissenschaftler war für die Auswahl und Koordination der durchzuführenden Untersuchungen, die Festlegung der Prüfparameter, die Anleitung der weiteren Projektmitarbeiter, sowie für die Auswertung der erzielten Ergebnisse verantwortlich. Bewertung und Interpretation der Ergebnisse erfolgten im Zusammenhang mit dem aktuellen Wissen über die Passivität nichtrostender Stähle und bekannte Einflussgrößen. Der FH-Ingenieur koordinierte sämtliche Arbeiten mit den Firmen des PA zur Probenherstellung, die Parametervariationen und überwachte die Arbeiten in den Betrieben vor Ort. Er koordinierte alle Auslagerungsversuche und führte gemeinsam mit dem Wissenschaftler die elektrochemischen Untersuchungen durch. Weiterhin stellte der FH-Ing. die umfassende, systematische Dokumentation der Versuchsergebnisse als Grundlage für die weitere Auswertung sicher. Der Zeitaufwand war unter Berücksichtigung der umfangreichen Probenmatrix und der Bearbeitung komplexer Fragestellungen angemessen.

Im Berichtszeitraum wurden keine Geräte mit einem Beschaffungswert über 2.500 € beschafft. Leistungen Dritter wurden nicht finanziert.

10 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Erst die Kombination von praxisnahen Auslagerungsversuchen und systematischen elektrochemischen Laboruntersuchungen ermöglicht eine gesicherte Aussage zum Einsatz der untersuchten alternativen Werkstoffe in verschiedenen Anwendungsbereichen. Die dabei bearbeitete Parametermatrix entspricht hinsichtlich der breiten Variation der Werkstoffe, der Bearbeitungsparameter und der Versuchsbedingungen in vollem Umfang dem vorgesehenen Arbeitsplan. Die konkrete Auswahl der Parameter erfolgte unter besonderer Berücksichtigung praxisorientierter Anwendungen und in enger Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss, insbesondere mit den Vertretern der Stahlindustrie und den metallverarbeitenden kmU. Die durchgeführten Untersuchungen waren zur Beantwortung der im Vorhaben zu behandelnden Fragestellungen bzgl. des Einsatzes von alternativen Legierungen im Bezug auf deren Korrosionsverhalten notwendig und angemessen.

Förderhinweis und Danksagung

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 16049 N / 1 der Forschungsvereinigung Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V. (GfKORR) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Wir bedanken uns bei allen Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die aktive Mitarbeit und für die finanzielle und materielle Unterstützung des Vorhabens.