

Chimia 52 (1998) 177–181  
© Neue Schweizerische Chemische Gesellschaft  
ISSN 0009–4293

# Umwelteinflüsse auf Werkstoffe

Markus Faller und Peter Richner\*

## Environmental Influences on Material

**Abstract.** Environmental effects on metallic materials are investigated by the combination of a field exposure programme and laboratory exposures. The exposure sites were chosen at locations of the Swiss National Air Pollution Monitoring Network (NABEL) in different regions of Switzerland. Using material loss and the type of corrosion products formed after four years in conjunction with the local climate data, the relevant parameters for the corrosion of the materials investigated can be deduced. Further insights into the mechanism are gained by laboratory exposures carried out in humid air containing single air pollutants (SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, laboratory air). Sulfur dioxide and the time of wetness are playing the most important factors for the corrosion of unalloyed carbon steel, zinc, and hot-dip galvanized steel. In the case of copper, ozone has to be considered in addition. The analysis of the mass of corrosion products retained on the surface of zinc samples showed that in the case of unsheltered specimens ca. 60% of the corroded zinc was lost while for the sheltered samples 90% of the corroded zinc remained on the surface of the specimen. The results of the study can be used for the evaluation of the air protection measures.

## 1. Einleitung

Die Veränderung von Werkstoffen durch Umwelteinflüsse lässt sich im weitesten Sinn ebenfalls unter dem Gesichtspunkt der Bauchemie betrachten. Die im folgenden beschriebenen Arbeiten beschäftigen sich mit der Korrosion, d.h. den chemischen Veränderungen metallischer Werkstoffe wie Baustahl, Zink, Aluminium oder Kupfer, welche alle im Bauwesen eine grosse Rolle spielen. Dabei steht der Einfluss der Umweltfaktoren Klima und Luftfremdstoffe auf die Art und die Geschwindigkeit der Korrosion der Werkstoffe im Zentrum der Untersuchungen.

Die Verwendung metallischer Werkstoffe im Bauwesen, insbesondere als Dach- und Wasserleitungsmaterialien, lässt sich bis in die Antike zurückverfolgen. Seit den Zeiten der Bleiwasserleitungen der Römer bis zur Gegenwart wurden

beständig neue metallische Werkstoffe entwickelt, wobei oftmals eine potentielle Anwendung im Bauwesen als Triebfeder wirkte. So sind metallische Werkstoffe aus dem heutigen Bauwesen nicht mehr wegzudenken. In den letzten Jahren haben beispielsweise auf dem Gebiet der Dächer die Metalle eine eigentliche Renaissance erlebt, und der Bauherr kann heute aus einer Vielzahl von Materialien (Kupfer, verzinnertes oder vorpatiniertes Kupfer, Zink, Kupfer-Titan-Zink, Chromstahl, verzinnter Chromstahl etc.) mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften auswählen. Nicht wegzudenken sind metallische Werkstoffe beispielsweise aus den Bereichen vorgehängte Fassaden, dem Strassenbau (Leitplanken, Signalisationsinstallationen etc.) oder dem Stahlbetonbau.

In allen geschilderten Anwendungsfällen werden Nutzungsdauern von 50 und noch mehr Jahren angestrebt. Dabei stehen nicht nur primär ökonomische Überlegungen im Vordergrund, sondern vor allem auch der Ruf nach einer nachhaltigen Entwicklung unserer Gesellschaft ist zu berücksichtigen. Da entsprechende Langzeiterfahrungen für neu entwickelte Werkstoffe fehlen und sich die Umweltbedingungen, insbesondere bezüglich der Luftschadstoffe, verändern, ist eine zuverlässige Voraussage der zu erwartenden Lebensdauer vielfach nicht möglich. In

der Mehrzahl der Fälle wird die Lebensdauer durch die Korrosion der Werkstoffe bestimmt. Die EMPA hat daher anfangs der neunziger Jahre ein langfristiges Projekt zum Studium der Umwelteinflüsse auf Werkstoffe gestartet, über das hier in der Startphase bereits einmal berichtet worden ist [1].

Bei der Korrosion von Metallen handelt es sich in den meisten Fällen um eine elektrochemische Reaktion, die nur in Gegenwart eines Elektrolyten auf der Oberfläche ablaufen kann. Dazu reicht schon eine wenige Nanometer dicke Wasserschicht aus, die sich bereits ausbildet bevor der Taupunkt erreicht wird. Luftfremdstoffe spielen bei der atmosphärischen Korrosion eine wichtige Rolle, ihre Deposition erfolgt entweder trocken oder nass auf der Werkstoffoberfläche. Daher finden sich auf diesen Oberflächen die gleichen Spezies bzw. ihre Folgeprodukte wie in der Atmosphäre: Sulfate, Nitrate, Nitrite, Chloride, Carbonate, Wasserstoff- und Ammoniumionen, Metallionen, Staubpartikel und organische Verbindungen. Sie sind alle Bestandteile der Elektrolytlösung auf der Werkstoffoberfläche, auf der die elektrochemische Reaktion der Korrosion abläuft, und bekanntermassen wird die Korrosion durch verschiedene der obenerwähnten Stoffe beschleunigt. Je nach Belastungsart und Werkstoff sind die Auswirkungen unterschiedlich.

Das Projekt gliedert sich in zwei Teilprojekte: Freibewitterung und Modellversuche im Labor. Durch die Freibewitterung von Werkstoffen an unterschiedlichen Standorten in der Schweiz sollen für jeden der untersuchten Werkstoffe die für sein Korrosionsverhalten relevanten Umweltparameter ermittelt werden. Das ebenfalls von der EMPA betriebene *Nationale Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL)* ist die ideale Plattform für ein derartiges Freibewitterungsprogramm, da an den NABEL-Stationen kontinuierlich eine umfassende Palette von Klima- und Luftschadstoffdaten erfasst wird. Bei den Modellversuchen in einer Schadgaskammer im Labor geht es darum, das in der Freibewitterung gefundene Degradationsverhalten unter beschleunigten Bedingungen nachzustellen und die Einflüsse der einzelnen Umweltparameter auf das Korrosionsverhalten der Werkstoffe zu quantifizieren. Der Nutzen des Projektes liegt in der Erarbeitung von quantitativen Dosis-Wirkungsfunktionen für das Korrosionsverhalten der metallischen Werkstoffe, der Entwicklung von realitätsnahen Umweltsimulationsprüfungen, die eine Lebensdauerabschätzung erlauben, und schliesslich ermöglichen die Resultate eine wir-

\*Korrespondenz: Dr. P. Richner  
Eidgenössische Materialprüfungs- und  
Forschungsanstalt (EMPA)  
Überlandstrasse 129  
CH-8600 Dübendorf  
Tel.: +41 1 823 55 11  
Fax: +41 1 823 40 15  
E-Mail: peter.richner@empa.ch

kungsorientierte Bewertung der Luftreinhaltmassnahmen aus werkstofftechnischer Sicht. Im folgenden soll anhand einiger Beispiele über den Stand des Projektes berichtet werden.

**2. Experimentelles**

Aus den total 16 Standorten des NABEL-Netzes wurden acht Stationen ausgewählt, die einen repräsentativen Quer-

schnitt durch die in der Schweiz zu erwartenden Belastungssituationen darstellen (vgl. Tab. 1). Die an den NABEL-Stationen erfassten Messparameter sind in der Tab. 2 zusammengestellt. Folgende Werkstoffe wurden exponiert: Baustahl (St 37), wetterfester Baustahl (WT St 52), Kupfer, feuerverzinkter Stahl, Zink und Aluminium. Es handelt sich dabei um entfettete und glasgestrahlte bzw. im Falle von Aluminium entfettete und gebeizte Bleche von 5x10 cm mit einer Dicke von 1-3

mm, die um 45° geneigt nach Süden ausgerichtet sind. Um den Einfluss der Bewitterungsart untersuchen zu können, werden am Standort Dübendorf Proben sowohl frei als auch überdacht bewittert.

Das Schadgasprüfsystem [2][3] besteht aus vier Einheiten mit Gasvorrat, Gasdosierung, Prüfkammer und Analysatoren (vgl. Fig. 1). Die effektive Prüfkammer besteht aus korrosionsbeständigem PVDF und befindet sich in einem Klimaschrank. Die Anlage verfügt über eine Steuerung, mit der jeder Parameter in vorgegebenen Grenzen (vgl. Tab. 3) einzeln programmiert werden kann, so dass sich beliebige Messprogramme (Einzelgasbelastung, Gasmische, zyklische Belastung etc.) zusammenstellen lassen.

Die Charakterisierung der bewitterten Proben (Freibewitterung und Schadgasexperimente) erfolgte nach unterschiedlichen Gesichtspunkten. Das Ausmass der Korrosion wird durch die *Dickenabnahme* beschrieben. Darunter versteht man die gravimetrisch bestimmte Reduktion des Querschnittes der Bleche nach Entfernung aller Korrosionsprodukte. Die Dickenabnahme eignet sich insbesondere auch zum Vergleich des Verhaltens unterschiedlicher Werkstoffe, da sie nicht massenabhängig ist. Die *Ablagerungen* und *Korrosionsprodukte* werden visuell mit Licht- und Rasterelektronenmikroskopie sowie die kristallinen Anteile mittels Röntgendiffraktion charakterisiert. Zudem werden in wässrigen Extrakten allfällig vorhandene korrosive Spezies wie Chloride und Sulfate bestimmt.

Davos	(1570 m ü. M.)	alpiner Standort, schwach belastet, trocken
Sion	(480 m ü. M.)	nahe Autobahn (20 m), trocken
Härkingen	(420 m ü. M.)	nahe Autobahn (5 m), feucht
Bern <sup>a)</sup>	(530 m ü. M.)	Stadtzentrum, mässig feucht
Payerne	(500 m ü. M.)	ländlich, feucht
Lägeren	(630 m ü. M.)	Wald, nahe Nebelgrenze, mässig feucht
Cadenazzo	(200 m ü. M.)	ländlich, feucht
Dübendorf <sup>b)</sup>	(430 m ü. M.)	Agglomeration, feucht
Dübendorf <sup>b)</sup>	(430 m ü. M.)	Agglomeration, feucht

<sup>a)</sup> 1997 wurde die Station Bern durch die Station Chaumont (1140 m ü. M.) ersetzt.

<sup>b)</sup> zusätzlich überdachter Stand.

Klimadaten	Luftfremdstoffe
Temperatur	Schwefeldioxid SO <sub>2</sub>
Wind (Geschwindigkeit und Richtung)	Stickstoffmonoxid NO
Niederschlagsmenge	Stickstoffdioxid NO <sub>2</sub>
relative Luftfeuchtigkeit	Ozon O <sub>3</sub>
Nasszeit	Chloride
	Stäube
	Stäube

Tab. 3. Parameterbereich der Schadgasprüfkammer

Temperatur	12-60°
relative Luftfeuchtigkeit	30-100%
Schadgase (einzeln oder kombiniert)	
SO <sub>2</sub>	0,1-100 ppm
H <sub>2</sub> S	0,1-100 ppm
NO	0,1-100 ppm
NO <sub>2</sub>	0,1-100 ppm
O <sub>3</sub>	3-16 ppm
Anzahl Luftwechsel pro Stunde in der Prüfkammer	8-24
Besprühung	6 Düsen für wässrige Lösung (ein/aus)

**3. Resultate**

Der Korrosionsprozess von Metallen kann schematisch folgendermassen dargestellt werden [4]:



Aus der Wechselwirkung von Metall und Umwelt entsteht ein Korrosionsprodukt MeU, das wiederum selber mit dem Metall und der Umwelt reagiert und zur Bildung eines modifizierten Korrosionsproduktes MeU\* führt, das auf der Werkstoffoberfläche verbleibt:



Die Bildung von MeU\* kann von Massenverlusten aufgrund mechanischer (L<sub>m</sub>) oder chemischer (L<sub>c</sub>) Prozesse begleitet werden. Dazu gehören das Abblättern von Korrosionsprodukten aufgrund von Spannungen oder durch mechanische Einwir-

kungen (starker Niederschlag, Hagel *etc.*) und das chemische Auflösen von Korrosionsprodukten gefolgt vom Abwaschen durch Regenwasser. Sofern diese Verluste und Fremdblagerungen vernachlässigbar klein sind, besteht eine lineare Beziehung zwischen der korrodierten Menge Metall  $m_{Me}$  und der Masse der Korrosionsprodukte  $m_{MeU^*}$ :

$$m_{MeU^*} = \sum \left( x_i \frac{M_i}{M_{Me}} \right) \times m_{Me}$$

$M_i$ : Molekularmasse des Korrosionsproduktes  $i$

$M_{Me}$ : Molekularmasse des Metalls

$x_i$ : Anteil der Spezies  $i$  an den Korrosionsprodukten

**3.1. Zink und feuerverzinkter Stahl**

Nach vier Jahren Freibewitterung finden sich deutliche Unterschiede in der Korrosionsgeschwindigkeit von Zink bzw. feuerverzinktem Stahl zwischen den einzelnen Standorten (vgl. Fig. 2). Die Dickenabnahme in Härkingen liegt *ca.* dreimal höher als in Davos. Im weiteren ist eine geringe Abnahme der Abtragungsgeschwindigkeit mit der Bewitterungsdauer zu erkennen. Die sich bildende Schicht von Korrosionsprodukten an der Oberfläche schützt den darunterliegenden Werkstoff zu einem gewissen Grad vor weiterer Korrosion. Allerdings ist diese 'Schutzschicht' zu wenig kompakt, um das Substrat vor Feuchtigkeit, Sauerstoff und anderen korrosionsfördernden Agenzien wirkungsvoll zu schützen, wie dies beispielsweise durch eine organische Beschichtung möglich ist. Die grössere Korrosionsgeschwindigkeit von Zink und feuerverzinktem Stahl in Härkingen reflektiert die im Vergleich zu Davos deutlich höhere Belastung mit Luftfremdstoffen und die längeren Nasszeiten.

Die Zinkkorrosionsprodukte bestehen vor allem aus dem basischen Zinkcarbonat Hydrozinkit ( $Zn_5(OH)_6(CO_3)_2$ ). Bei der Umwandlung von metallischem Zink in Hydrozinkit kommt es zu einer Massenzunahme von *ca.* 68%. Fig. 3 zeigt den Anteil des korrodierten Zinks, der sich noch auf der Oberfläche befindet, falls sich nur Hydrozinkit als Korrosionsprodukt gebildet hat und die Masse der Fremdblagerungen vernachlässigbar klein ist. Dargestellt werden die Werte der überdachten Proben in Dübendorf und der Mittelwert aller freibewitterten Proben an den acht Stationen. Diese Einzelwerte

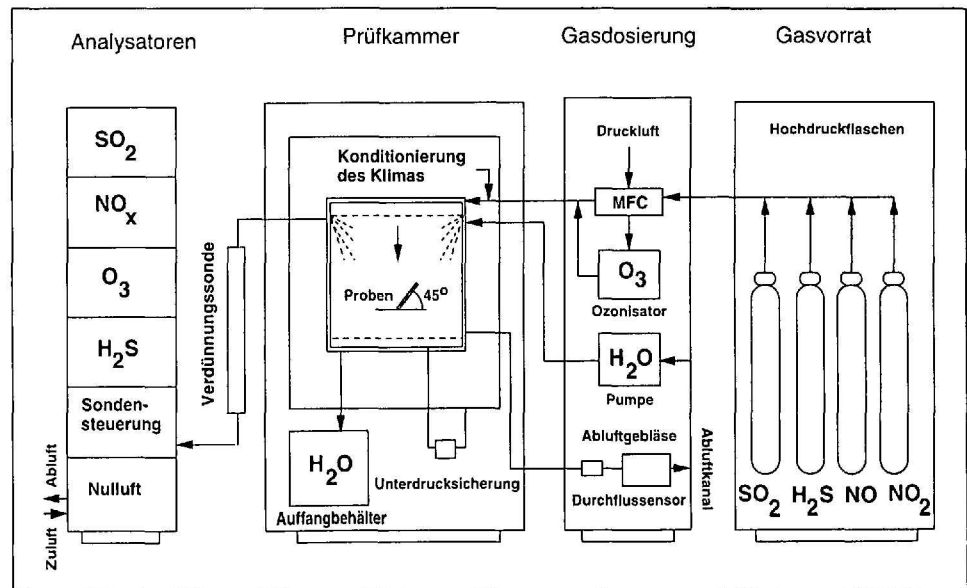


Fig. 1. Schema des Schadgasprüfsystems

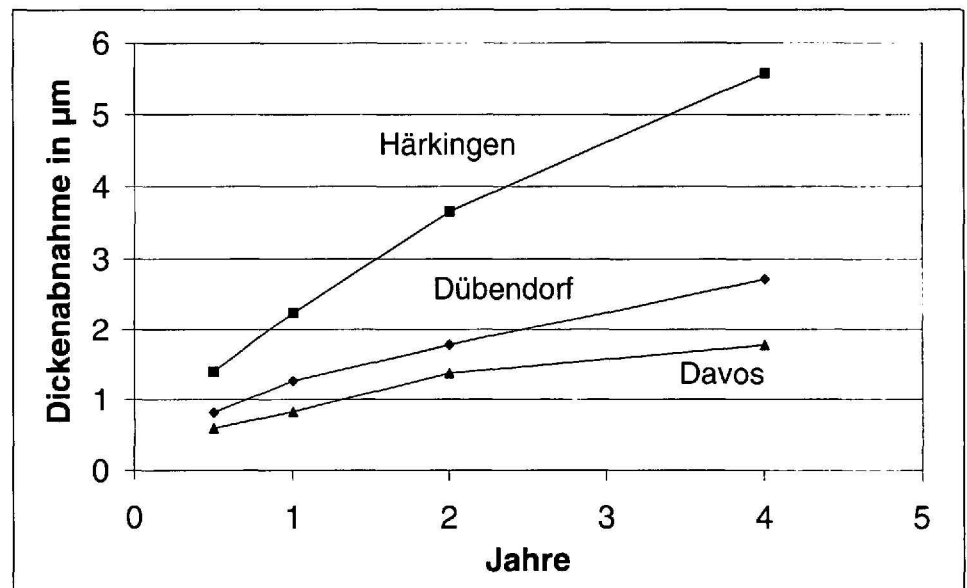


Fig. 2. Vergleich des zeitlichen Verlaufes der Dickenabnahme von Zink an den Standorten Dübendorf (freibewittert), Davos und Härkingen

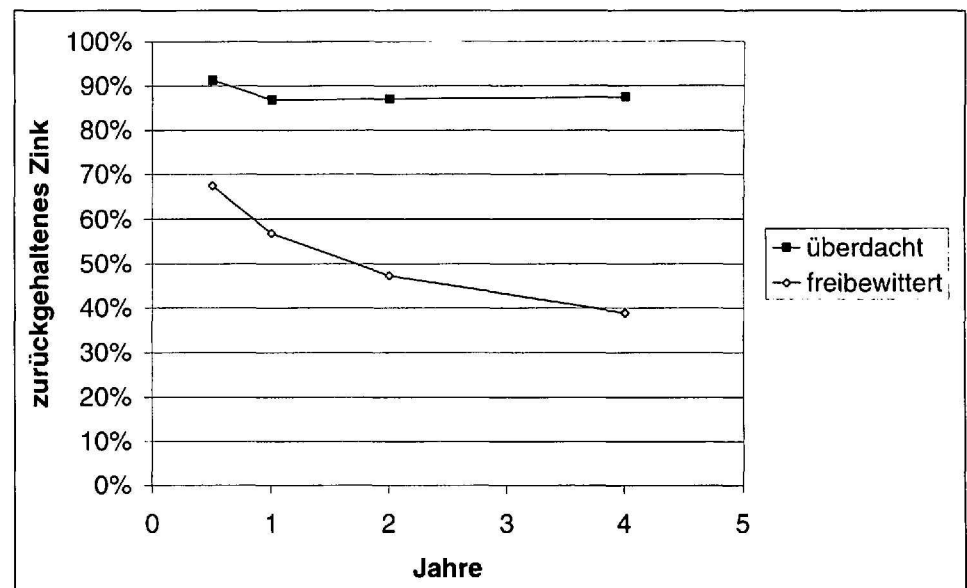


Fig. 3. Anteil des korrodierten Zinks, das nach vier Jahren Freibewitterung auf der Oberfläche verbleibt. Freibewittert: Mittelwert aller Stationen; überdacht: Dübendorf.

wurden zusammengefasst, da sie sich praktisch nicht unterscheiden. Während bei den freibewitterten Proben nach vier Jahren nur ca. 40% des korrodierten Zinks sich noch auf der Metalloberfläche befindet, verbleiben auf den überdachten Proben fast 90%. Daraus kann geschlossen

werden, dass Zink vor allem durch Regenwasser von der Oberfläche entfernt wird. Abplatzungen scheinen dagegen eine viel kleinere Rolle zu spielen, da ansonsten auch bei den überdachten Proben mit einem grösseren Verlust gerechnet werden müsste. Dies wird auch durch die morpho-

logischen Untersuchungen im Licht- und Rasterelektronenmikroskop bestätigt, die im Fall von Zink fast keine Hinweise auf Abplatzungen liefern. Allerdings ist zu beachten, dass bei den überdachten Proben die Fremdadlagerungen mitgemessen wurden, was in diesem Fall zu einer tendenziell zu geringen Verlustrate an Zink führt. Die relativ grosse Verlustrate von 60% ist einerseits auf den schmalen pH-Bereich, in dem die Zinkkorrosionsprodukte beständig sind, zurückzuführen [5], andererseits auf die Löslichkeit intermediär gebildeter Zinkverbindungen.

3.2. Kupfer

Wie bei Zink findet man bei Kupfer nach vier Jahren Freibewitterung signifikante Unterschiede in der Korrosionsgeschwindigkeit abhängig vom Standort. Interessanterweise herrscht aber für Kupfer nicht in Härkingen sondern in Cadenazzo das aggressivste Klima, was auf die unterschiedlichen Korrosionsmechanismen der beiden Metalle zurückzuführen ist. Eine relativ gute Korrelation besteht zwischen der Dickenabnahme von Kupfer und den atmosphärischen Parametern SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> und Nasszeit (vgl. Fig. 4), während für Zink praktisch nur SO<sub>2</sub> und Nasszeit berücksichtigt werden müssen. Die Nasszeit wird definiert als die Zeit, während der die relative Luftfeuchtigkeit grösser als 80% ist und die Temperatur über 0° liegt. Bei diesen Bedingungen kann davon ausgegangen werden, dass sich ein dünner Wasserfilm auf der Substratoberfläche bildet, in dem die elektrochemische Reaktion der Korrosion ablaufen kann.

Der Einfluss der einzelnen Luftfremdstoffe auf das Korrosionsverhalten von Kupfer wurde in Modellversuchen in der Schadgaskammer untersucht [6]. Die Konzentrationen der Schadgase wurden so gewählt, dass eine ähnliche Präsentationsrate wie in der Freibewitterung erreicht wurde. Die Präsentationsrate berechnet sich aus dem Produkt von Konzentration und Windgeschwindigkeit und bestimmt, wieviel Schadstoff auf der Werkstoffoberfläche adsorbiert werden kann. Die Resultate von Versuchen mit Einzelgasen über vier Wochen bei 90% relativer Luftfeuchtigkeit und 25° sind in Fig. 5 dargestellt. Obwohl in diesen Versuchen die SO<sub>2</sub>-Präsentationsrate an der obersten Grenze der Freibewitterungswerte liegt, findet man kleinere Dickenabnahmen als für O<sub>3</sub> und NO<sub>2</sub>. Die mikroskopische Untersuchung der Proben zeigte, dass im Fall von 0,5 ppm SO<sub>2</sub> ein lokaler Angriff auf das Kupfer erfolgt. Nach einer Woche sind nur 5–10% der Oberfläche angegriffen. Mit dem Fortschreiten der Korrosion wird die gan-

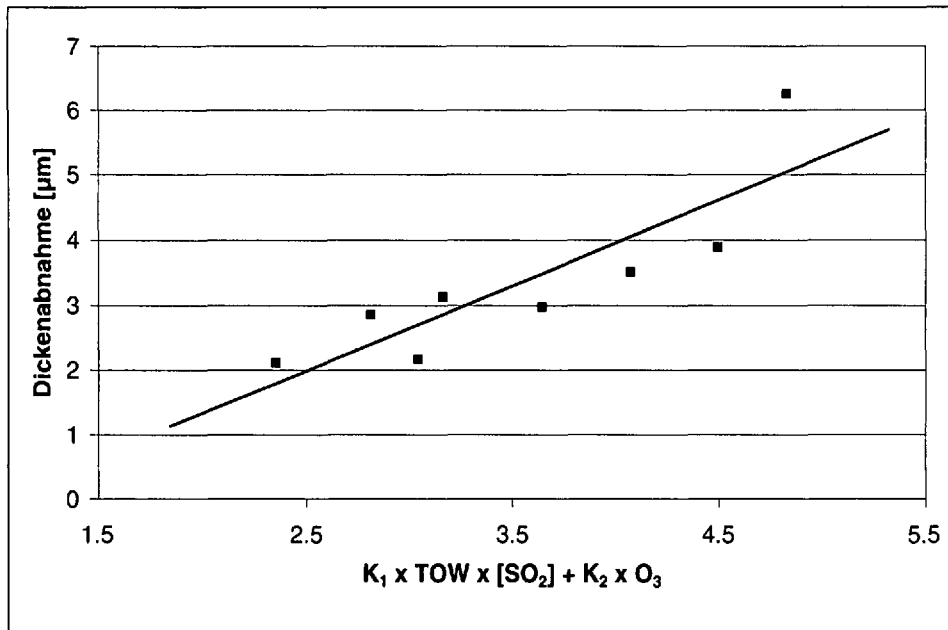


Fig. 4. Korrelation zwischen der Dickenabnahme von Kupfer nach vier Jahren und den atmosphärischen Parametern SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> und Nasszeit (Time of Wetness, TOW) für die acht Freibewitterungsstationen

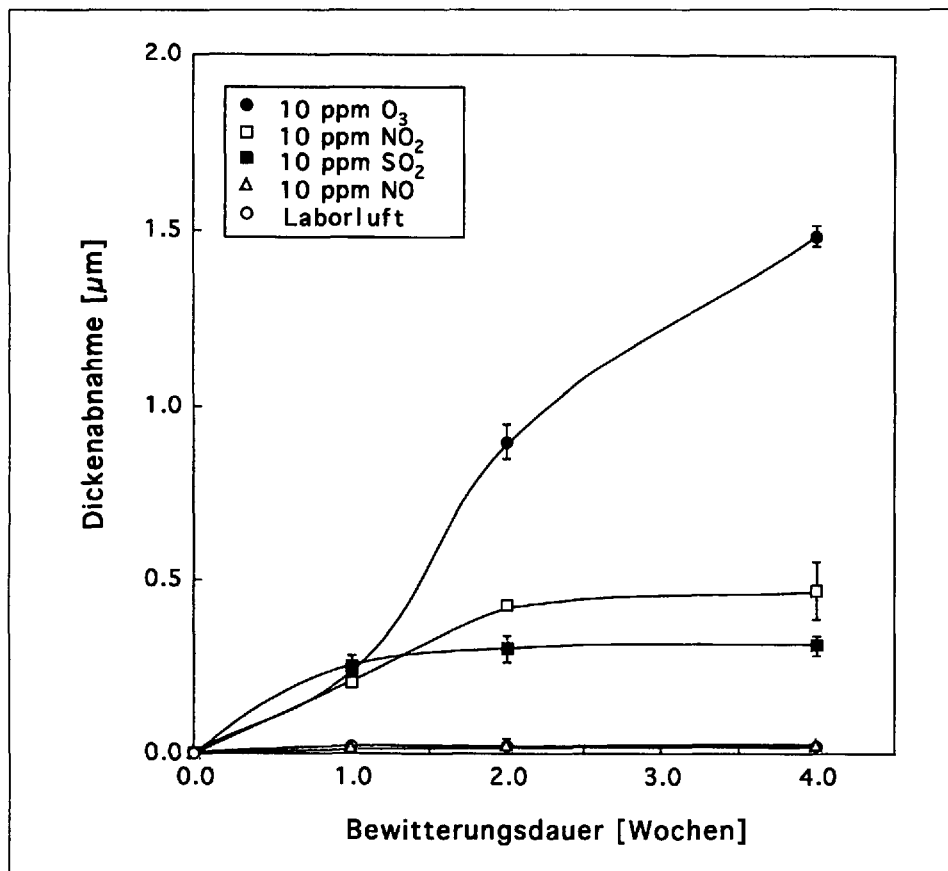


Fig. 5. Zeitlicher Verlauf der Dickenabnahme von Kupfer bei 25° und 90% rel. Luftfeuchtigkeit bei Einzelgasexposition

ze Fläche mit einer Schicht von Korrosionsprodukten überdeckt. Bei einer Konzentration von 10 ppm SO<sub>2</sub> ist bereits nach einer Woche praktisch die ganze Oberfläche korrodiert. Die Korrosion kommt damit praktisch zum Stillstand, da die Korrosionsprodukte (hauptsächlich Antlerit (Cu<sub>3</sub>SO<sub>4</sub>(OH)<sub>4</sub>)) das darunterliegende Metall vor einem weiteren Angriff schützen.

Auch in Gegenwart von NO<sub>2</sub> kann eine Verlangsamung der Korrosion beobachtet werden, nicht aber bei O<sub>3</sub>. In beiden Fällen erfolgt der Angriff gleichmässig auf der ganzen Oberfläche. Als Hauptkomponente konnte in beiden Fällen Cuprit (Cu<sub>2</sub>O) nachgewiesen werden. In der NO<sub>2</sub>-Atmosphäre fanden sich viel kleinere Kristalle als im Fall von O<sub>3</sub>. Ob dies der einzige Grund für den unterschiedlichen Verlauf des Korrosionsangriffes ist, kann momentan noch nicht beantwortet werden.

#### 4. Diskussion

Durch den Vergleich von Freibewitterungsergebnissen und Modellversuchen im Labor ist es möglich, für einzelne metallische Werkstoffe eine Dosis-Wirkungsfunktion zu entwickeln, die den Zusammenhang zwischen atmosphärischen Parametern und der Korrosionsrate beschreibt. Während für unlegierten und verzinkten Stahl in erster Linie der Gehalt an SO<sub>2</sub> und die Nasszeit zu berücksichtigen sind, müssen für andere Werkstoffe noch weitere Luftschadstoffe berücksichtigt werden. Je nach Standort können die Korrosionsraten zwischen den einzelnen Standorten um bis zu einem Faktor drei variieren. Die zu erwartende Lebensdauer hängt somit sehr stark vom Standort ab. Zudem braucht der Werkstoff, der sich am Standort A optimal verhält, nicht in jedem Fall der beste Werkstoff am Standort B zu sein. Bei dieser Betrachtung sind insbesondere auch Fragen der Abschwemmungen von Korrosionsprodukten in die Umwelt in einen ganzheitlichen Ansatz zur Auswahl des Werkstoffes miteinzubeziehen.

Generell sind die Resultate von Freibewitterungsversuchen denen von Modellversuchen vorzuziehen, da sich mit den Modellversuchen in der Schadgaskammer die Verhältnisse in der Realität bloss partiell nachstellen lassen. Mit nur acht Auslagerungsstationen sind einer statistisch gesicherten Herleitung von quantitativen Wirkungsbeziehungen aber enge Grenzen gesetzt, auch wenn die Resultate aus den Schadgasversuchen zugezogen werden können. Abhilfe wird durch die Teilnah-

me an einem internationalen UN-Freibewitterungsprogramm mit 32 Stationen in Europa, Israel und Nordamerika geschaffen. Die 32 Stationen wurden so ausgewählt, dass es möglichst wenige bezüglich ihrer klimatischen Verhältnisse redundante Stationen dabei hat. Aufgrund ihrer Erfahrung mit der Konzeption und Auswertung von Freibewitterungsstudien übernahm die EMPA die Verantwortung für den Werkstoff Zink innerhalb des Programmes. Dies beinhaltet die Präparation, den Versand und die Beurteilung aller Proben nach der Freibewitterung. Erste Resultate dieser Versuchsreihe sind frühestens in zwei Jahren zu erwarten.

Je genauer die Dosis-Wirkungsfunktionen aus Freibewitterungsversuchen abgeleitet werden können, umso eher besteht die Möglichkeit, realitätsnahe Modellversuche im Labor durchzuführen. Damit werden sich die Chancen verbessern, durch Umweltsimulationsprüfungen für neue Kombinationen von Werkstoffen und Umweltbedingungen verlässliche Aussagen über das Langzeitverhalten der Werkstoffe machen zu können.

In Anbetracht der grossen Anstrengungen, die in der Schweiz auf dem Sektor Luftreinhaltmassnahmen gemacht worden sind, ist es erfreulich zu sehen, dass sich diese Massnahmen auch positiv auf das Verhalten metallischer Werkstoffe auswirken. So führt beispielsweise eine Reduktion des SO<sub>2</sub>-Gehaltes in der Luft um 50% annähernd zu einer Halbierung der Korrosionsgeschwindigkeit von Baustahl und Zink. In der Tat ist der SO<sub>2</sub>-Gehalt in der Luft in den letzten Jahrzehnten durch die schrittweise Senkung des Schwefelgehaltes im Heizöl auch kontinuierlich gesunken, und Feuerverzinkungen haben heute eine deutlich höhere Lebenserwartung als vor 40 Jahren. Der Anstieg der O<sub>3</sub>-Konzentration könnte hingegen die Korrosion von Kupfer beschleunigen.

Metallische Werkstoffe spielen in unserem täglichen Leben eine grosse Rolle, und sie verkörpern ein beträchtliches Investitionsvolumen. Aus Gründen der Sicherheit und der Nachhaltigkeit liegt es im Interesse unserer Gesellschaft, abhängig vom Standort und der zu übernehmenden Aufgabe den optimalen Werkstoff auswählen zu können. Dazu tragen die Resultate der vorliegenden Studie wesentlich bei. Die regionalen und werkstoffabhängigen Unterschiede in der korrosiven Belastung konnten nachgewiesen und quantifiziert werden. Gleichzeitig leisten sie einen Beitrag zur wirkungsorientierten Bewertung von Luftreinhaltmassnahmen.

Eingegangen am 16. März 1998

- [1] S. Oesch, M. Faller, P. Heimgartner, 'Umwelteinflüsse auf Werkstoffe', *Chimia* **1994**, *48*, 217.
- [2] S. Oesch, 'Effect of SO<sub>2</sub> on the corrosion of unalloyed steel and weathering steel – an attempt to simulate atmospheric corrosion', *Materials and Corrosion* **1996**, *47*, 505.
- [3] M. Zöbeli, P. Richner, 'Korrosionsprüfungen mit Schadgasen', *Technica* **1997**, *3*, 8.
- [4] S. Oesch, P. Heimgartner, 'Environmental effects on metallic materials – Results of an outdoor exposure programme running in Switzerland', *Materials and Corrosion* **1996**, *47*, 425.
- [5] T.E. Graedel, 'Corrosion mechanisms for zinc exposed to the atmosphere', *J. Electrochem. Soc.* **1989**, *136*, 193C.
- [6] S. Oesch, M. Faller, 'The effect of the air pollutants SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO and O<sub>3</sub> on the corrosion of Cu, Zn and Al', *Corros. Sci.* **1997**, *39*, 1505.