Endbericht zum Forschungsvorhaben FKZ 108 07 034

Kartierung von Toleranzgrenzwerten der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien in Deutschland

Dipl.-Geogr. Frank Anshelm
Dipl.-Geogr. Thomas Gauger
Dipl.-Geogr. Renate Köble
Institut für Navigation
der Universität Stuttgart

mit einem Beitrag von
Dipl.-Ing. Petra Mayerhofer
Dipl.-Phys. Bert Droste-Franke
Dr.-Ing. habil. Rainer Friedrich
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendnung
der Universität Stuttgart

IM AUFTRAG
DES UMWELTBUNDESAMTES

September 1998

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung 6

2 Vorgehensweise 8

3 Datenakquisition 11

4 Kartierung der Klima- und Schadstoffparameter 13
4.1 Klimaparameter 13
4.2 Schadstoffparameter 13
4.2.1 Schwefeldioxid-Immission 13
4.2.2 Ozon-Immission 14
4.2.3 Chlorid-Deposition 14
4.2.4 Deposition von H^+ 15

5 Berechnung und Kartierung aktueller Korrosionsraten 16
5.1 Berechnung aktueller Korrosionsraten mit den UBA- und BLfD-Funktionen 16
5.1.1 Verwitterungsbeständiger Stahl (frei exponiert) 17
5.1.2 Zink (frei exponiert) 18
5.1.3 Kupfer (frei exponiert) 18
5.1.4 Bronze (frei exponiert) 19
5.1.5 Portland Kalkstein (frei exponiert) 21
5.1.6 Mansfield Sandstein (frei exponiert) 21
5.2 Berechnung aktueller Korrosionsraten mit den vereinheitlichten ICP-Funktionen 21
5.2.1 Verwitterungsbeständiger Stahl (frei exponiert) 22
5.2.2 Zink (frei exponiert) 23
5.2.3 Aluminium (frei exponiert) 23
5.2.4 Kupfer (frei exponiert) 24
5.2.5 Bronze (frei exponiert) 25
5.2.6 Portland Kalkstein (frei exponiert) 25
5.2.7 Mansfield Sandstein (frei exponiert) 26
5.2.8 Alkyd-Melamin-Anstrich auf verzinktem Stahlblech (frei exponiert) 26
5.2.9 Siliziumalkyd-Anstrich auf Stahlplatten (frei exponiert) 27
5.2.10 Nickel (in geschützter Form exponiert) 28
5.2.11 Zinn (in geschützter Form exponiert) 28
5.2.12 Glas (frei exponiert) 29
5.3 Abschließende Bemerkungen zur Kartierung aktueller Korrosionsraten mit unterschiedlichen Dosis-Wirkungs-funktionen 29

6 Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 31
6.1 Verwitterungsbeständiger Stahl – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 32
6.2 Zink – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 33
6.3 Aluminium – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 34
6.4 Kupfer – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 35
6.5 Bronze – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 36
6.6 Portland Kalkstein – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 37
6.7 Mansfield Sandstein – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 38
6.8 Abschließende Bemerkungen zur Kartierung der Überschreitung der akzeptablen Korrosionsraten $K_{acc}(1,5)$, $K_{acc}(2)$ und $K_{acc}(3)$ 39

7 Ökonomische Abschätzung der Materialschäden in Deutschland 41
7.1 Einleitung 41
7.2 Methodik 41
7.2.1 Schadenskomponenten bei Sachgütern 41
7.2.2 Verfahren zur Berechnung der Instandsetzungskosten 43
7.2.3 Kulturgüter 45
7.2.4 Frühere Studien 47
7.3 Herleitung der Kataster für Gebäude und Materialoberflächen 48
7.3.1 Die Herleitung des Gebäudekatasters 48
7.3.2 Ableitung eines Materialkatasters 52
7.4 Quantifizierung 60
7.4.1 Die Dosis-Wirkungsbeziehungen 60
7.4.2 Instandsetzungskriterien und -kosten 61
7.4.3 Quantifizierte Schadenskosten an Wohngebäuden 62
7.4.4 Sensitivitätsanalyse 66
7.4.5 Vergleich mit früheren Studien 70
7.5 Zusammenfassung und Ausblick 70

8 Zusammenfassung 72

9 Summary 77

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Kartierung von Toleranzgrenzwerten zur Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien. 10
Abb. 2: Faktor F aus Gleichung (3) für verschiedene Zinssätze in Abhängigkeit von der Lebensdauer 45
Abb. 3: Flußbild für das Verfahren zur Quantifizierung von Instandsetzungskosten an Gebrauchsgütern.....46
Abb. 4: Histogramm der mit der ICP-Gleichung quantifizierten Schadenskosten für galvanisierten Stahl.....64
Abb. 5: Histogramm der mit der UBA-Gleichung quantifizierten Schadenskosten für galvanisierten Stahl.....64
Abb. 6: Histogramm der mit der ICP-Gleichung quantifizierten Schadenskosten für alle Natursteine zusammen 65
Abb. 7: Histogramm der mit der UBA-Gleichung quantifizierten Schadenskosten für alle Natursteine zusammen 65
Abb. 8: Variation der mit der ICP-Gleichung quantifizierten Schadenskosten für galvanisierten Stahl mit der kritischen Dicke sowie den flächenspezifischen Instandsetzungskosten.....67
Abb. 9: Variation der mit der ICP-Gleichung quantifizierten Schadenskosten für Zink mit der kritischen Dicke sowie den flächenspezifischen Instandsetzungskosten 67
Abb. 10: Variation der mit der ICP-Gleichung quantifizierten Schadenskosten für Aluminium mit der kritischen Dicke sowie den flächenspezifischen Instandsetzungskosten.....68
Abb. 11: Variation der mit den ICP-Gleichungen quantifizierten Schadenskosten für Naturstein mit der kritischen Dicke sowie den flächenspezifischen Instandsetzungskosten.....68
Abb. 12: Variation der mit der ICP-Gleichung quantifizierten Schadenskosten für Putz mit der kritischen Dicke sowie den flächenspezifischen Instandsetzungskosten 69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: An Kunst- und Bauwerken verwendete Materialien, für die aus den Ergebnissen des achtjährigen Expositionsversuchs Dosis-Wirkungsfunktionen abgeleitet werden konnten.....7
Tabelle 2: Datenquellen der Depositionsmessungen (Cl^-, H^+) in Deutschland und dem grenznahen Österreich.....12
Tabelle 3: Anzahl der zu den Interpolationen herangezogenen Meßstationen. 14
Tabelle 4: Statistik zu den Ergebnissen der Berechnungen mit den UBA- und BLfD-Funktionen.....18
Tabelle 5: Statistik zu den Ergebnissen der Berechnungen mit den ICP-Funktionen.....24
Tabelle 6: Hintergrundkorrosionsraten (frei exponiert) und akzeptable Korrosionsraten.....32
Tabelle 7: Verwitterungsbeständiger Stahl - Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korrosionsraten 33
Tabelle 8: Zink – Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korrosionsraten.....34
Tabelle 9: Aluminium – Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korrosionsraten 35
Tabelle 10:Kupfer - Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korrosionsraten 36
Tabelle 11: Bronze - Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korrosionsraten 37
Tabelle 12:Bronze - Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korrosionsraten 38
Tabelle 13: Mansfield Sandstein - Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korrosionsraten 39
Tabelle 14: Gliederung der Gebäude in der GWZ87 (Auszug) (Für mit „Kreis“ bzw. „Land“ gekennzeichnete Zellen stehen Daten auf Kreis- bzw. Landesebene zur Verfügung; für Zellen ohne Eintrag gibt es keine Daten. Fettgedruckt sind die Daten, die in dieser Studie verwendet werden.) 49
Tabelle 15: Gliederung der Gebäude in der GWZ95 (Auszug) (Für mit „x“ gekennzeichnete Zellen stehen Daten zur Verfügung. Fettgedruckt sind die Daten, die in dieser Studie verwendet werden.) 50
Tabelle 16: Gliederung der Gebäude in der FGWB95 (Auszug) (Für mit „Kreis“ bzw. „Land“ gekennzeichnete Zellen stehen Daten auf Kreis- bzw. Landesebene zur Verfügung; für Zellen ohne Eintrag gibt es keine Daten. Fettgedruckt sind die Daten, die in dieser Studie verwendet werden.) 51
Tabelle 17: Anzahl der Wohngebäude in Deutschland 1995 (Zusammenfassung des Gebäudekataster) 52
Tabelle 18: Gebäudetypenmatrix für die alten Bundesländer (Gülec *et al.*, 1994a).....54
Tabelle 19: Gebäudetypen für die neuen Bundesländer (Gülec *et al.*, 1994a).....55
Tabelle 20: Spezifikation der Gebäudetypen je Siedlungstyp in der Studie von Roth *et al.* (1980) (ST = Siedlungstyp).....57
Tabelle 21: Fläche [m^2] je Gebäude je Siedlungstyp, abgeleitet aus Ergebnissen von (Hoos *et al.*, 1987) für Gebäude in Dortmund und Köln.....58

Tabelle 22: Grundlagen der Zuordung von Materialoberflächen je Gebäude je Gebäudetyp (ST = Siedlungstyp) 59
Tabelle 23: Für Deutschland quantifizierte Materialflächen an Wohngebäudeaußenflächen im Jahr 1995 59
Tabelle 24: Verwendete kritische Dicken sowie flächenspezifischen Instandsetzungskosten inkl. Bandbreiten für die Sensitivitätsanalyse 62
Tabelle 25: Quantifizierter Anteil der Materialflächen an Wohngebäuden, die wegen der Luftbelastung in den Jahren 1993 bis 1995, pro Jahr instandgesetzt werden müssen sowie resultierende jährliche Instandsetzungskosten (n. q. nicht quantifiziert) 63
Tabelle 26: Schadenskosten, die mit den ICP-Gleichungen für das Materialkataster berechnet werden, bei dem die Durchschnitte von Dortmund und Köln auf ganz Deutschland extrapoliert werden (s. Tabelle 23) 66
Tabelle 27: Schadenskosten, die mit ICP-Gleichungen unter Abzug der Schäden durch Hintergrundkorrosion (s. Tabelle 6) berechnet werden 70

1 Einführung

Die Aufklärung des Verfalls von Materialien einschließlich historischer Gebäude und Denkmäler wurde im Rahmen der Aktivitäten zum Genfer Luftreinhalteübereinkommen als ein vorrangiges Ziel erachtet. Um einige der Hauptwissenslücken auf diesem Gebiet zu schließen, wurde im Jahre 1985 ein entsprechendes Internationales Kooperativprogramm eingerichtet (NAGEL & GREGOR 1998). Im Rahmen dieses Programms (International Cooperative Programme on Effects of air pollution on Materials, including Historic and Cultural Monuments, ICP Materials) werden wissenschaftliche Grundlagen der Schadstoff-Rezeptor-Wirkungsbeziehungen zwischen Klima- und Luftschadstoffparametern einerseits und der Korrosion, respektive Verwitterung von an Kunst- und Bauwerken verwendeten Materialien andererseits erarbeitet[1].

Hierzu lieferte ein in Form einer gestaffelten 8-Jahres-Materialexposition (Start: September 1987) durchgeführter Feldversuch umfangreiches Datenmaterial. Der Feldversuch wurde an 39 Testorten in 14 Ländern durchgeführt. Proben verschiedener, an Kunst- und Bauwerken häufig verwendeter Materialien wurden unter standardisierten Bedingungen den an den jeweiligen Standorten herrschenden Klima- und Luftschadstoffbedingungen ausgesetzt. Die Versuchsbedingungen ließen sowohl einen offenen als auch einen regengeschützten Angriff auf die Materialien zu. Da die Testorte in unmittelbarer Nähe zu Klimameßstationen lagen, konnten die zugehörigen Klima- und Luftschadstoffdaten exakt protokolliert werden. Nach 1-, 2-, 4- und 8-jähriger Expositionsdauer wurden einzelne Proben der Materialien hinsichtlich der an ihnen aufgetretenen Korrosionserscheinungen untersucht.

Aus den Ergebnissen des Expositionsversuchs wurden Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen der Immission beziehungsweise Deposition von Luftschadstoffen, klimatischen Faktoren und den an den Proben der Materialien aufgetretenen Korrosionsschäden abgeleitet (UN ECE 1998). Für jedes der untersuchten Materialien wurde darüber hinaus eine sogenannte Hintergrundkorrosionsrate definiert. Sie soll die Größenordnung der Korrosionsschäden beschreiben, wie sie unter quasinatürlichen Bedingungen, das heißt unter Ausschluß anthropogener Einflüsse auftreten würde. Mit der Berücksichtigung der materialspezifischen Hintergrundkorrosionsraten soll der Tatsache Rechnung getragen werden, daß Korrosionsschäden selbst in Reinluftgebieten auftreten, und die Korrosion mithin ein natürlicher, in der korrosiven Wirkung der Atmosphäre begründeter Vorgang ist.

Die aus dem achtjährigen Expositionsversuch abgeleiteten Dosis-Wirkungsfunktionen und Hintergrundkorrosionsraten sind Grundlage und Ausgangspunkt der im Rahmen des Projekts „Kartierung von Toleranzgrenzwerten der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien in Deutschland“ durchzuführenden Kartierungsarbeiten. In Tabelle 1 sind die Materialien aufgeführt, für die Dosis-Wirkungsfunktionen zur Verfügung stehen. Darüber hinaus sind die Institutionen genannt, die die jeweiligen Dosis-Wirkungsfunktionen erarbeitet haben.

[1] der Einfachheit halber wird im Folgenden nur noch von Korrosion und Korrosionsraten gesprochen, in Bezug auf Gesteine sind jedoch auch Verwitterung bzw. Verwitterungsraten gemeint.

Tabelle 1: An Kunst- und Bauwerken verwendete Materialien, für die aus den Ergebnissen des achtjährigen Expositionsversuchs Dosis-Wirkungsfunktionen abgeleitet werden konnten.

Material	Dosis-Wirkungsfunktionen		
	Swedish Corrosion Institute (SCI)	**Umweltbundesamt (UBA)**	**Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (BLfD)**
Verwitterungsbeständiger Stahl	+	+	
Kupfer	+	+	+
Bronze	+	+	+
Zink	+	+	
Portland Kalkstein	+	+	
Mansfield Sandstein	+		
Aluminium	+		
Alkyd-Melamin-Anstrich auf verzinktem Stahlblech	+		
Silizium-Alkyd-Anstrich auf Stahlplatten	+		
Nickel	+		
Zinn	+		
Glas	+		

2 Vorgehensweise

Die Kartierungsarbeiten orientieren sich an Leitlinien der Kartierung von Critical Loads und Levels, die von der Sonderarbeitsgruppe „Kartierung“ erarbeitet und in Form eines Methodenhandbuchs veröffentlicht wurden (UBA 1996). Das in Abbildung 1 dargestellte Verfahrensschema der „Kartierung von Toleranzgrenzwerten der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien in Deutschland“ berücksichtigt die Vorgaben dieses Methodenhandbuchs. Nicht alle der ursprünglich geplanten Arbeiten konnten innerhalb des auf ein Jahr befristeten Projektzeitraums bearbeitet werden. Die grau hinterlegten Bereiche kennzeichnen den derzeitigen Stand der Bearbeitung. Die Berechnung und Kartierung der Toleranzgrenzwerte für SO_2, O_3, Cl^- und H^+ kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht in Angriff genommen werden, da die dazu benötigten Funktionen noch nicht vorliegen. In der Folge muß auch auf die Berechnung und Kartierung der Überschreitung der Toleranzgrenzwerte der entsprechenden Schadstoffe, sowie auf die angestrebte Ableitung von Argumenten für Emissionsminderungsmaßnahmen aus den Kartierungsarbeiten verzichtet werden.

Die Auswertung der Ergebnisse des Expositionsversuchs wird innerhalb des ICP Materials von verschiedener Seite, jedoch unter Federführung des Swedish Corrosion Institute betrieben. Zur Berechnung und Kartierung aktueller Korrosionsraten stehen für einzelne Materialien mehrere, unabhängig voneinander entwickelte Dosis-Wirkungsfunktionen zur Verfügung, woraus sich die Möglichkeit eines Vergleichs der mit unterschiedlichen Dosis-Wirkungsfunktionen errechneten Kartierungsergebnisse ergibt. Neben dem Swedish Corrosion Institute in Stockholm beteiligen sich das Umweltbundesamt in Berlin und das Bayerische Landesamt für Denkmalpflege in München an der Erarbeitung von Dosis-Wirkungsbeziehungen. Alle verwendeten Funktionen basieren auf Ergebnissen des achtjährigen Expositionsversuchs und beziehen sowohl Klima- als auch Schadstoffparameter in die Berechnungen mit ein. Auf Details der Dosis-Wirkungsfunktionen wird in Kapitel 5 eingegangen.

Mittels der Dosis-Wirkungsbeziehungen können für die verschiedenen Materialien aktuelle Korrosionsraten (K_{act}) berechnet werden. Sie kennzeichnen die an den jeweiligen Materialien unter aktuellen[2] Klima- und Luftschadstoffbedingungen zu beobachtende Korrosion. Als Hintergrundkorrosionsrate (K_{10}) wird materialspezifisch das jeweilige 10. Perzentil aller im Zuge des Materialexpositionsprogramms beobachteten Korrosionsraten verwendet. Aus den Hintergrundkorrosionsraten läßt sich für jedes Material eine sogenannte akzeptable Korrosionsrate (K_{acc}) ableiten. Sie dient der Kennzeichnung der Grenze zwischen der gerade noch akzeptablen und der nicht mehr zu tolerierenden Schädigung eines Materials durch Luftverunreinigungen. Die akzeptablen Korrosionsraten (K_{acc}) sind als Vielfache der Hintergrundkorrosionsraten (K_{10}) definiert und lassen sich gemäß $K_{acc} = K_{10} \cdot n$ berechnen. Der Gewichtungsfaktor „n“ soll gemäß UMWELTBUNDESAMT (1996) Werte zwischen 1,2 und 2 annehmen können. In UN ECE (1998) hingegen werden für „n“ Werte zwischen 1,5 und 3 vorgeschlagen. Die Überschreitung der akzeptablen Korrosionsraten entspricht der Differenz aus aktueller und akzeptabler Korrosionsrate.

Die Abschätzung der durch Korrosionsvorgänge entstehenden volkswirtschaftlichen Schäden wurde als Unterauftrag an das Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart vergeben. Über die am IER im Berichtszeitraum Oktober 1997 – März 1998 durchgeführten Arbeiten informiert Kapitel 7.

[2] „aktuelle“ Klima- und Luftschadstoffbedingungen werden näherungsweise durch die Verwendung der mittleren Klima- und Luftschadstoffbedingungen der Periode 1993 bis 1995 beschrieben.

Im Detail umfassen die Arbeiten im Berichtszeitraum Oktober 1997 bis September 1998 folgende Arbeiten:

- Akquisition von Daten zur relativen Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Niederschlagsmenge in Deutschland beim Deutschen Wetterdienst (DWD).
- Recherche und Akquisition von Depositionsdaten zur Chlorid- und Protonenkonzentration im Niederschlag aus den Meßnetzen und Meßprogrammen in Deutschland. Einbindung der Depositionsdaten in die am Institut für Navigation bereits vorhandene Depositionsdatenbank.
- Einbindung der beim Deutschen Wetterdienst akquirierten Klimadaten unter ARC.INFO und Erstellung von Karten zur mittleren Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur und Niederschlagsmenge in Deutschland (jeweils Jahresmittelwerte 1993 – 1995).
- Erstellung hochaufgelöster Depositions- und Immissionskarten (1km · 1km) für die Schadstoffparameter SO_2, O_3, Cl^- und H^+ mittels Kriging-Interpolation unter ARC.INFO.
- Berechnung der aktuellen Korrosionsraten K_{act} für die Materialien Kupfer, Bronze, Zink, Verwitterungsbeständiger Stahl, Portland Kalkstein und Mansfield Sandstein unter Verwendung der vom Umweltbundesamt berechneten Dosis-Wirkungsbeziehungen. Erstellung der zugehörigen Karten.
- Berechnung der aktuellen Korrosionsraten K_{act} für die Materialien Kupfer, Bronze, Zink, Verwitterungsbeständiger Stahl, Portland Kalkstein, Mansfield Sandstein, Aluminium, Glas, Nickel, Zinn und zwei verschiedene Korrosionsschutzanstriche auf Stahl unter Verwendung der vom Swedish Corrosion Institute berechneten Dosis-Wirkungsbeziehungen. Erstellung der zugehörigen Karten.
- Berechnung der aktuellen Korrosionsraten K_{act} für die Materialien Kupfer und Bronze unter Verwendung der vom Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege ermittelten Dosis-Wirkungsbeziehungen. Erstellung der zugehörigen Karten.
- Berechnung verschiedener akzeptabler Korrosionsraten K_{acc} für die oben genannten Materialien.
- Berechnung der prozentualen Überschreitung der verschiedenen akzeptablen Korrosionsraten und Erstellung der zugehörigen Karten für alle zur Verfügung stehenden Dosis-Wirkungsfunktionen.
- Vergleich der mit unterschiedlichen Dosis-Wirkungsfunktionen errechneten Kartierungsergebnisse.
- Ökonomische Abschätzung der Materialschäden in Deutschland (Kapitel 7)

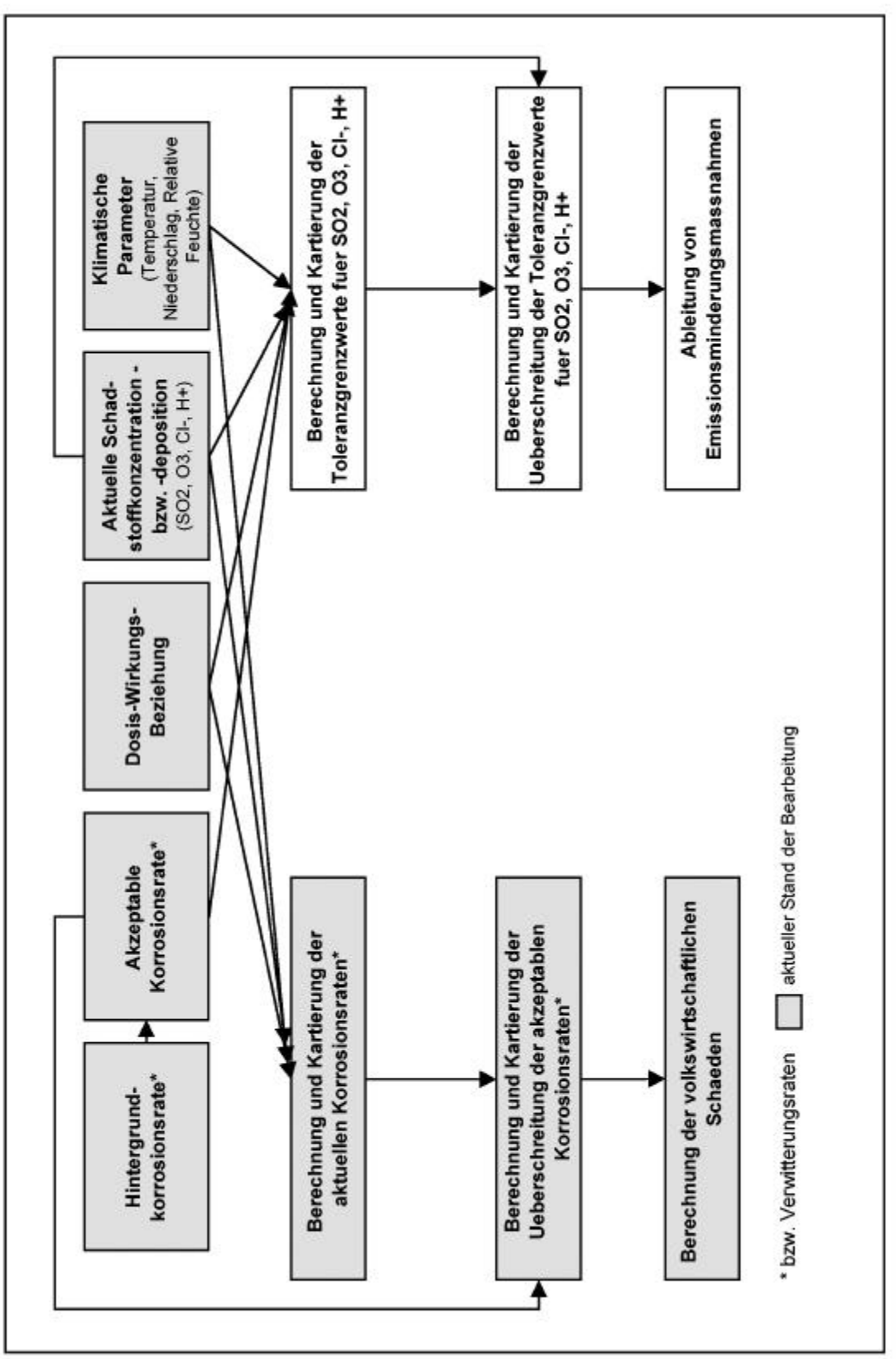

Abb.1: Kartierung von Toleranzgrenzwerten zur Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien.

3 Datenakquisition

Die Daten zur jährlichen Niederschlagsmenge, Lufttemperatur und mittleren jährlichen Luftfeuchtigkeit in Deutschland wurden beim Deutschen Wetterdienst in Hamburg in Formi-digitaler Karten in einer Auflösung von 1km · 1km akquiriert.

Bezüglich der Daten zu den Schadstoffparametern SO_2, O_3, Cl^- und H^+ kann auf eine im Auftrag des Umweltbundesamtes im Zusammenhang mit weiteren Projekten ähnlicher Fragestellung[3] angelegte umfangreiche Datensammlung des INS zurückgegriffen werden. Im Zuge weiterer Recherchen wird diese Datensammlung fortlaufend aktualisiert und erweitert. Immissionsdaten (SO_2, O_3) stammen aus Meßnetzen der Bundesländer und des Umweltbundesamtes. Die Konzentrationsdaten für Cl und H^+ im Niederschlag wurden innerhalb einer aufwendigen Recherche bei den Umweltbehörden der Länder, den Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalten, beim Umweltbundesamt und anderen Forschungseinrichtungen akquiriert. In Tabelle 2 sind die Datenquellen der Depositionsdaten aufgelistet.

[3] - Kartierung kritischer Belastungskonzentrationen und –raten für empfindliche Ökosysteme in der Bundesrepublik Deutschland und anderen ECE-Ländern.
- Kritische Luftschadstoff-Konzentration und Eintragsraten sowie ihre Überschreitung für Wald und Agrarökosysteme sowie naturnahe waldfreie Ökosysteme.

Tabelle 2: Datenquellen der Depositionsmessungen (Cl^-, H^+) in Deutschland und dem grenznahen Österreich

Land	Institution, Abteilung, Ort	Kürzel
Länderübergreifend	Umweltbundesamt, Fg. II 4.3 Meßnetz; Offenbach	UBA-OF
Länderübergreifend	Umweltbundesamt, Fg. II 4.3; Berlin	UBA-B
Länderübergreifend	Institut für Troposphärenforschung e.V., Abt. Chemie; Leipzig	IFT
Länderübergreifend	Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Sekt. Analytik; Leipzig	UFZ
Länderübergreifend	Bundesforschundsanstalt für Landwirtschaft BS-Völkenrode, Institut für agrarrelevante Klimaforschung; Müncheberg	FAL
Schleswig-Holstein	Gewerbeaufsichtsamt Itzehoe, Dez. Luftqualitätsüberwachung	GAA-SH
Schleswig-Holstein	Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, Flintbek, Abteilung Gewässer	LNU-SH (LaWaKü)
Hamburg	Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Hamburg	DWD
Mecklenburg-Vorpommern	Landesamt für Umwelt und Natur, Abt. Immissionsschutz; Güstrow-Gülzow	LAUN-MV
Niedersachsen	Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Abt. 6 Immissionsschutz; Hannover	NLÖ-H
Niedersachsen	Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt, Abt. Umweltkontrolle; Göttingen	NFVA
Niedersachsen	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover	BGR
Brandenburg	Landesumweltamt Brandenburg, Nebenstelle Lauchhammer	LUA-BB
Berlin	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz, Abt. III A 31; Berlin	SenV-B.
Sachsen-Anhalt	Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt; Halle	LfU-ST
Nordrhein-Westfalen	Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten/Landesamt für Agrarordnung, Dez. Bioindikation, Biomonitoring; Recklinghausen	LÖBF/LAFAO-NRW
Nordrhein-Westfalen	Landesanstalt für Immissionsschutz, Nordrhein-Westfalen, Abt. 3; Essen	LIS-NRW
Hessen	Hessische Landesanstalt f. Forsteinrichtung, Waldforschung und Waldökologie; Hannoversch Münden	HLFWW
Hessen	Universität Gießen, Institut für Pflanzenökologie	Univ. GI
Sachsen	Sächsische Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Abt. L1 Luft-Lärm-Strahlen; Radebeul	SLUG
Sachsen	Technische Universität Dresden, Institut für Pflanzen- und Holzchemie; Tharandt	TU-DD
Rheinland-Pfalz	Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Abt. Waldschutz; Trippstadt	FVA-RP
Bayern	Bayerische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft, Abt. Forsthydrologie, Freising	BLWF
Bayern	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft; München	BLFW
Saarland	Forstplanungsanstalt des Saarlandes; Saarbrücken Univ. des Saarlandes, ZFU, AG-Forst; Duttweiler	FPA-SA
Baden-Württemberg	Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg; Freiburg i. B.	FVA-BW
Baden-Württemberg	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Ref. 31 Luftreinhaltung Klima; Karlsruhe	LFU-BW
Österreich	Technische Universität Wien, Institut für Analytische Chemie, Abt. Umweltanalytik	TU Wien

4 Kartierung der Klima- und Schadstoffparameter

4.1 Klimaparameter

Die beim Deutschen Wetterdienst (DWD) akquirierten Daten zur mittleren jährlichen Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur und Niederschlagsmenge konnten in digitaler Form akquiriert werden[4]. Nach Einbindung unter ARC.INFO wird aus den Karten der Einzeljahre 1993, 1994 und 1995 je eine Karte der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge 1993-1995 (Karte 1), der mittleren jährlichen Lufttemperatur (Karte 2) und der mittleren jährlichen Luftfeuchtigkeit 1993-1995 (Karte 3) erstellt.

4.2 Schadstoffparameter

Die Daten zu den Schadstoffparametern liegen als Punktdaten vor. Die zur Erstellung der Karten notwendigen Interpolationen werden unter Verwendung des Kriging-Verfahrens durchgeführt. Für die Jahre 1993, 1994 und 1995 wird zu jedem Schadstoffparameter jeweils eine Karte in einer Auflösung von 1km · 1km erstellt.Anschließend wird für jeden Schadstoffparameter aus den Karten der drei Einzeljahrgänge 1993, 1994 und 1995 für die Periode 1993-1995 je eine Karte der mittleren Schadstoff-Immission beziehungsweise der mittleren Schadstoff–Konzentration im Niederschlag erarbeitet. Sämtliche Berechnungen erfolgen unter ARC.INFO 7.1.1. Eine kleinräumige Interpretation der Karten ist aufgrund des verwendeten Interpolationsverfahrens nicht zulässig.

4.2.1 Schwefeldioxid-Immission

Den Interpolationen zur Schwefeldioxid-Immission liegen Meßwerte von jeweils circa 500 Meßstationen zugrunde (Tabelle 3). Karte 4 zeigt die Resultate der Kriging-Interpolation zu den Jahrgängen 1993, 1994 und 1995, sowie die räumliche Verteilung der zur jeweiligen Schätzung herangezogenen Meßstationen. Für den Zeitraum 1993 bis 1995 läßt sich ein deutlicher Trend zu abnehmender SO_2-Belastung konstatieren. Das Konzentrationsniveau liegt großflächig bei < 15 µg/m³ und somit unter den Critical Levels für Wald und natürliche Vegetation (UN ECE 1992). Der Immissionswert der TA-Luft (140 µg/m³ Jahresmittelwert) wird selbst in den industriellen Regionen Sachsens, Sachsen-Anhalts und Thüringens deutlich unterschritten. Entsprechendes gilt für die mittlere Schwefeldioxid-Immission 1993-1995 (Karte 5). Maximale Werte von bis zu 62 µg/m³ werden in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen erreicht. Dem stehen SO_2-Immissionen von < 15 µg/m³ in Mecklenburg-Vorpommern und im nördlichen Brandenburg gegenüber. In den alten Bundesländern bewegen sich die SO_2-Immissionen der Jahre 1993 – 1995 ebenfalls im Bereich von < 15 µg/m³. Lediglich in einigen städtisch-industriellen Ballungszentren treten Werte von 15-30 µg/m³ auf.

[4] Die vom DWD verwendeten Interpolationsverfahren zur Erstellung von Klimakarten sind in Müller-Westermeier (1995) erläutert.

Tabelle 3: Anzahl der zu den Interpolationen herangezogenen Meßstationen.

Jahr	SO_2	O_3	H^+	Cl^-
1993	503	112	182	234
1994	516	123	186	234
1995	492	132	150	195

4.2.2 Ozon-Immission

Die Daten zur Ozon-Immission müssen vor Durchführung der Interpolation gefiltert werden. Da Ozonmessungen an verkehrsnahen Stationen aufgrund hoher Ozonreduktionsraten durch NO-Emissionen des Verkehrs nur die lokale Situation beschreiben, sollten diese, in Anbetracht der Zielsetzung einer flächenhaften Darstellung für das gesamte Bundesgebiet, bei der Interpolation nicht berücksichtigt werden. Demzufolge ist eine Klassifizierung der Ozon-Meßstationen in Abhängigkeit ihrer Lage zum Verkehr notwendig. Die Klassifizierung wird anhand eines von KÖBLE, SMIATEK & GAUGER (1997) entwickelten Verfahrens vorgenommen. Dabei können „verkehrsnah“ und „verkehrsfern“ gelegene Stationen anhand des Verhältnisses von NO_2- zu NO-Messungen ausgegliedert werden. Bezüglich der Methodik des Verfahrens wird an dieser Stelle auf die ausführliche Beschreibung des Auswahlverfahrens in KÖBLE, SMIATEK & GAUGER (1997) verwiesen. Von den in 1993 insgesamt zur Verfügung stehenden 294 Ozon-Meßstationen werden daher nur 112 in die Berechnungen mit einbezogen. Für 1994 verbleiben 123 von 304, für das Jahr 1995 132 von 329 Stationen. In Tabelle 3 ist die Anzahl der Meßwerte zusammengestellt, die in den verschiedenen Jahren zur Interpolation jeweils zur Verfügung steht.

Für die Berechnung der Karten zur Ozon-Immission stehen im Vergleich zur Interpolation der SO_2-Karten somit deutlich weniger Meßwerte zur Verfügung. Die geringe Zahl an Meßwerten und deren ungleichmäßige Verteilung im Raum geht zu Lasten der räumlichen Genauigkeit des Interpolationsergebnisses.

Die Jahresmittelwerte der Ozon-Immission sind in starkem Maße von den Wetterbedingungen im Sommer des jeweiligen Jahres abhängig. Dementsprechend kann sich die räumliche Verteilung von Gebieten mit starker beziehungsweise weniger starker Ozon-Belastung von Jahr zu Jahr stark verändern (Karte 6). Das Ergebnis der Verschneidung der Karten zu den Einzeljahren 1993 bis 1995 zu einer Karte der mittleren Ozon-Immission 1993-1995 ist in Karte 7 dargestellt. Das Jahresmittel 1993-1995 liegt großflächig zwischen 30 und 50 µg/m³. An Bergstationen wurden im Zeitraum 1993 bis 1995 Ozon-Jahresmittelwerte von bis zu 93 µg/m³ gemessen. Sehr geringe Ozon-Konzentrationen wurden in diesen Jahren im Ruhrgebiet gemessen. Eine mögliche Ursache für die geringen Ozon-Werte im Ruhrgebiet könnte das in diesem Gebiet großräumig hohe Verkehrsaufkommen und der damit verbundene hohe Stickstoffoxid-Ausstoß sein. Niedrige Ozon-Werte in Ballungsräumen können darüber hinaus auf relativ hohe Konzentrationen flüchtiger organischer Kohlenstoffverbindungen (VOC = Volantile Organic Compounds) zurückzuführen sein. Als Ursachen für die Emission flüchtiger organischer Kohlenstoffverbindungen sind neben dem Verkehr in erster Linie die chemische Industrie und die Verwendung von Lösemitteln zu nennen.

4.2.3 Chlorid-Deposition

Für die Interpolation der Karten zur Chlorid-Konzentration im Niederschlag kann auf die Meßwerte von circa 200 Stationen (Tabelle 3) zurückgegriffen werden. Konzentrationen > 1 mg/l können im wesentlichen nur in Küstennähe festgestellt werden (Karte 8). Aufgrund

vorherrschender Westwinde sind hiervon primär die nach Westen exponierten Küstengebiete der Nordsee betroffen, wo in den Jahren 1993 bis 1995 bis zu 11 mg Chlor pro Liter Niederschlag deponiert wurden. Die geringeren Depositionsraten entlang der Ostseeküste resultieren in erster Linie aus dem im Vergleich zur Nordsee deutlich geringeren Salzgehalt der Ostsee. Die Salz-Fracht auflandiger Winde ist an der Ostsee relativ gering. Zudem mag eine Rolle spielen, daß die salzbeladenen Westwinde aus der Nordsee beim Überstreichen der schleswig-holsteinischen und dänischen Landgebiete einen Teil ihrer Salzfracht verlieren und in Mecklenburg-Vorpommern zu nurmehr geringen Chlorid-Depositionen führen. Karte 9 ergibt sich aus der Mittelung der Karten zu den Einzeljahren 1993 bis 1995 und beschreibt die mittlere Chlorid-Konzentration im Niederschlag für die Periode 1993-1995.

4.2.4 Deposition von H^+

Zur Interpolation der Karten der jährlichen H^+-Konzentration im Niederschlag stehen die Meßwerte von 150 bis 186 Stationen zur Verfügung (Tabelle 3). Maximale Depositionsraten von bis zu 95 µg/l sind im Südosten der neuen Bundesländer festzustellen (Karte 10), wobei zwischen 1993 und 1995 eine Tendenz zu abnehmender H^+-Konzentration im Niederschlag zu erkennen ist. Auf dem Gebiet der alten Bundesländer werden Konzentrationen von 50 µg/l nur in 1993 kleinräumig überschritten. Die aus der Mittelung der Karten zu den Einzeljahren 1993 bis 1995 hervorgegangene Karte 11 spiegelt diese Verhältnisse wider.

5 Berechnung und Kartierung aktueller Korrosionsraten

Die Berechnung aktueller Korrosionsraten erfolgt anhand der aus den Ergebnissen des achtjährigen Expositionsversuchs abgeleiteten Dosis-Wirkungsfunktionen (UBA 1996). An der Ermittlung der Dosis-Wirkungsfunktionen haben sich, unter Federführung des Swedish Corrosion Institute in Stockholm, mehrere Institutionen beteiligt, so daß für einzelne Materialien auf bis zu drei verschiedene, weitgehend unabhängig voneinander entwickelte, Typen von Dosis-Wirkungsfunktionen zurückgegriffen werden kann. In Tabelle 1 sind alle Materialien aufgeführt, für die Dosis-Wirkungsfunktionen zur Verfügung stehen. Zunächst werden die vom Umweltbundesamt (UBA) in Berlin entwickelten Dosis-Wirkungsfunktionen für die Materialien Verwitterungsbeständiger Stahl, Bronze, Kupfer, Zink, Portland Kalkstein und Mansfield Sandstein verwendet. Im folgenden werden diese Funktionen als UBA-Funktionen angesprochen. Die vom Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege (BLfD) für die Materialien Kupfer und Bronze entwickelten Dosis-Wirkungsfunktionen werden im folgenden als BLfD-Funktionen angesprochen. Auf dem UN ECE Workshop on Quantification of Effects of Air Pollutants on Materials vom 25.-27. Mai 1998 in Berlin wurde beschlossen für alle weiterführenden Arbeiten die vom Swedish Corrosion Institute ermittelten Dosis-Wirkungsfunktionen zu verwenden. Diese werden als vereinheitlichte ICP-Funktionen angesprochen. Vereinheitlichte ICP-Funktionen stehen für insgesamt zwölf Materialien zur Verfügung (Tabelle 1). Zusätzlich zu den sechs Materialien, für die vom Umweltbundesamt Dosis-Wirkungsfunktionen berechnet werden können, stehen Funktionen für die Materialien Nickel und Zinn (elektrische Kontaktmaterialien), Aluminium, Glas, sowie die beiden Anstriche Silizium-Alkyd auf Stahlplatten und Alkyd-Melamin auf verzinktem Stahlblech zur Verfügung.

Die Kartierungsergebnisse der mit den unterschiedlichen Dosis-Wirkungsfunktionen berechneten aktuellen Korrosionsraten sind nur bedingt vergleichbar, da sich die Ergebnisse der Berechnungen mit den UBA- und den BLfD-Funktionen auf das vierte Jahr der Exposition, die der Berechnungen mit den vereinheitlichten ICP-Gleichungen auf das achte Jahr der Exposition beziehen. Im folgenden soll zunächst auf die mit den UBA- und BLfD-Funktionen erzielten Ergebnisse eingegangen werden. Anschließend werden die Ergebnisse der Kartierungsarbeiten mit den vereinheitlichten ICP-Funktionen vorgestellt.

5.1 Berechnung aktueller Korrosionsraten mit den UBA- und BLfD-Funktionen

Die UBA- und BLfD-Funktionen standen bereits zu einem relativ frühen Zeitpunkt zur Verfügung. Da zu diesem Zeitpunkt noch keine, auf den Ergebnissen des achtjährigen Expositionsversuchs basierende, Werte zu den Hinterrundkorrosionsraten zur Verfügung standen, werden die Berechnungen mit diesen Funktionen für das vierte Jahr der Exposition durchgeführt. Auf die dadurch entstehende Problematik der Vergleichbarkeit der mit den UBA- und BLfD-Funktionen berechneten Kartierungsergebnisse mit den Resultaten der Berechnungen mittels der vereinheitlichten ICP-Funktionen wurde bereits hingewiesen.

In die Berechnungen aktueller Korrosionsraten mit den UBA- und BLfD-Funktionen gehen folgende Parameter mit ein:

- Klimatische Parameter:
  [Rh]: Relative Feuchte in %
  [Rain]: Mittlere jährliche Niederschlagssumme in mm
- Schadstoffparameter
  [SO_2]: Schwefeldioxid-Konzentration in µg/m³
  [O_3]: Ozon-Konzentration in µg/m³
  [Cl^-]: Chlorid-Konzentration im Niederschlag (wet only) in mg/l
  [H^+]: Protonenkonzentration im Niederschlag (wet only) in g/l
  [H^+mm]: Protonenfracht in g/m² (berechnet aus der durchschnittlichen jährlichen Niederschlagsmenge in mm und der Protonenkonzentration im Niederschlag in g/l)

5.1.1 Verwitterungsbeständiger Stahl (frei exponiert)

Die vom Umweltbundesamt (UBA) in Berlin berechnete Dosis-Wirkungsfunktion für Verwitterungsbeständigen Stahl berücksichtigt die Schadstoffparameter SO_2 und Chlorid, den Klimaparameter Relative Feuchte, sowie den Parameter [H^+mm], der sich aus der Multiplikation der durchschnittlichen jährlichen Niederschlagsmenge in mm mit der H^+-Konzentration im Niederschlag in g/l ergibt. Damit entspricht dieser Parameter der Protonenfracht (mittlere jährliche Depositionsfracht von H^+). Er wird im folgenden auch so angesprochen. Die aktuellen Korrosionsraten werden als jährlicher Massenverlust in g/m² ausgedrückt.

UBA-Funktion für Verwitterungsbeständigen Stahl:

$$^tML_{Fe(un)} = 27{,}35\ t^{0{,}6} + \{0{,}262\ [SO_2] + 3.77\ [Cl^-] + 75{,}9\ [H^+mm]\} \cdot t + 2{,}51\ [Rh] \quad (1)$$

Gleichung (1) berechnet den Massenverlust nach Ablauf der Zeit t. Um den Massenverlust im vierten Jahr der Exposition berechnen zu können, muß der Massenverlust nach drei Jahren Expositionsdauer vom Massenverlust nach vierjähriger Expositionsdauer abgezogen werden.

Gemäß $ML = {}^4ML - {}^3ML$ ergibt sich für das vierte Jahr der Exposition folgende Formel:

$$ML_{Fe(un)} = 9{,}96 + 0{,}262\ [SO_2] + 3{,}77\ [Cl^-] + 75{,}9\ [H^+mm] \quad (2)$$

Aus der Berechnung ergeben sich aktuelle Korrosionsraten von 11,5 bis 53,5 g/m² (Tabelle 4). Maximale jährliche Massenverluste treten in Gebieten höchster Chlorid-Konzentration im Niederschlag auf. Dies sind im wesentlichen die Küstengebiete der Nordsee (Karte 9 und Karte 12). Doch auch in den Gebieten hoher SO_2-Immission werden hohe Korrosionsraten errechnet (Karte 5 und Karte 12). Der korrosiven Wirkung der Chloridkonzentration im Niederschlag wird von der UBA-Funktion jedoch mehr Gewicht beigemessen als der SO_2-Immission.

Tabelle 4: Statistik zu den Ergebnissen der Berechnungen mit den UBA- und BLfD-Funktionen

Material	Minimum g/m²	Maximum g/m²	Mittelwert g/m²	Standardabweichung g/m²
Verwitterungsbeständiger Stahl (UBA)	11,5	53,3	17,9	4,4
Zink (UBA)	4,2	17,6	6,6	1,7
Kupfer (UBA)	3,5	10,4	4,9	1,2
Kupfer (BLfD)	3,3	10,5	4,8	0,7
Bronze (UBA)	1,9	9,1	3,8	1,3
Bronze (BLfD)	2,8	7,8	3,6	0,6
Portland Kalkstein (UBA)	2,4*	15,6*	5,8*	2,4*
Mansfield Sandstein (UBA)	2,2*	16,4*	5,5*	2,6*

* Die Werte für Portland Kalkstein und Mansfield Sandstein sind in µm Oberflächenrückweichung angegeben.

5.1.2 Zink (frei exponiert)

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die aktuellen Korrosionsraten des Materials Zink. Die Berechnungen mit der UBA-Funktion ergeben für das vierte Jahr der Exposition aktuelle Korrosionsraten zwischen 4,2 und 17,6 g/m² (Tabelle 4). Die Maxima liegen wiederum an der Westküste Schleswig-Holsteins und den vorgelagerten Inseln (Karte 13). Hier werden auch die höchsten Chlorid-Konzentrationen im Niederschlag gemessen (Karte 9). Darüber hinaus lassen sich in den Gebieten höchster SO_2-Immission (Region Halle-Leipzig-Dresden) erhöhte aktuelle Korrosionsraten lokalisieren (Karte 5 und Karte 13). Geringe Korrosionsraten werden Süddeutschland, Nordbrandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, sowie auch in Hessen, Rheinland-Pfalz, Südniedersachsen und Nordrhein-Westfalen festgestellt.

Die vom Umweltbundesamt berechnete Dosis-Wirkungsfunktion für Zink berücksichtigt die Immission von SO_2, die Chlorid-Konzentration im Niederschlag, sowie die Protonenfracht [H^+mm]. Die aktuelle Korrosionsrate wird auch hier als jährlicher Massenverlust in g/m² angegeben.

UBA-Funktion für Zink:

$$^{t}ML_{Zn(un)} = 10{,}01\ t^{0{,}6} + \{0{,}116\ [SO_2] + 1{,}20\ [Cl^-] + 41{,}2\ [H^+mm]\} \cdot t$$

Gemäß $ML = {}^{4}ML - {}^{3}ML$ ergibt sich für das vierte Jahr der Exposition folgende Funktion:

$$ML_{Zn(un)} = 3{,}65 + 0{,}116\ [SO_2] + 1{,}20\ [Cl^-] + 41{,}2\ [H^+mm]$$

5.1.3 Kupfer (frei exponiert)

Für die Korrosion von Kupfer spielt neben dem Einfluß der Schwefeldioxid-Immission auch die Ozon-Belastung der Luft eine gewichtige Rolle. Ein Vergleich der mit der UBA-Funktion und der BLfD-Funktion erzielten Ergebnisse offenbart eine bemerkenswerte Übereinstimmung sowohl hinsichtlich der Höhe als auch der räumlichen Verteilung der berech-

neten aktuellen Korrosionsraten. Die vom Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege ermittelte Funktion gewichtet den Einfluß der Ozon-Immission etwas stärker, die Dosis-Wirkungsfunktion des Umweltbundesamtes mißt der SO_2-Immission größeres Gewicht bei.

Die UBA-Funktion berücksichtigt die SO_2- und O_3-Immission, sowie die Protonenfracht. Die Kartierungsergebnisse werden als Massenverlust in g/m² angegeben.

UBA-Funktion für Kupfer:

$$^{t}ML_{Cu(un)} = 4{,}46\ t^{0{,}6} + \{0{,}107\ [SO_2] + 0{,}040\ [O_3] + 12{,}9\ [H^+mm]\} \cdot t$$

Gemäß $ML = {}^{4}ML - 3ML$ ergibt sich für das vierte Jahr der Exposition:

$$ML_{Cu(un)} = 1{,}62 + 0{,}107\ [SO_2] + 0{,}040\ [O_3] + 12{,}9\ [H^+mm]$$

Für das vierte Jahr der Exposition ergeben sich Korrosionsraten zwischen 3,5 und 10,4 g/m² (Tabelle 4). Die SO_2-Immission hat den größten Einfluß auf die errechneten Korrosionsmassenverluste. Dies zeigt sich darin, daß höchste aktuelle Korrosionsraten im Raum Halle-Leipzig-Dresden und somit in den Gebieten maximaler SO_2-Immission festzustellen sind (Karte 5 und Karte 14).

Die vom Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege ermittelte Dosis-Wirkungsfunktion berücksichtigt die SO_2- und O_3-Immission, die Relative Feuchte, sowie die Protonenfracht. Die Ergebnisse der Berechnungen werden auch hier als Massenverlust in g/m² angegeben. Analog zur Vorgehensweise bei Anwendung der UBA-Funktionen muß auch bei den Berechnungen mit den BLfD-Funktionen die Korrosionsrate nach drei Jahren Expositionsdauer von der Korrosionsrate nach vierjähriger Expositionsdauer abgezogen werden, um zur Korrosionsrate im vierten Jahr der Exposition zu gelangen.

BLfD-Funktion für Kupfer:

$$ML_{Cu(un)} = \text{INV Ln}\ (\{\text{Ln}\ [4] \cdot 0{,}74489 + [SO_2] \cdot 1{,}26178\text{E-}02 + [Rh] \cdot 2{,}50081\text{E-}02 + [O_3] \cdot 1{,}04782\text{E-}02 + [H^+mm] \cdot 2{,}56213\} - \{\text{Ln}\ [3] \cdot 0{,}74489 + [SO_2] \cdot 1{,}26178\text{E-}02 + [Rh] \cdot 2{,}50081\text{E-}02 + [O_3] \cdot 1{,}04782\text{E-}02 + [H^+mm] \cdot 2{,}56213\})$$

Für das vierte Jahr der Exposition ergeben sich Korrosionsmassenverluste zwischen 3,3 und 10,5 g/m² (Tabelle 4). Wiederum wird der Wirkung des SO_2 größte Bedeutung zugemessen. So treten maximale Korrosionsmassenverluste in Sachsen auf (Karte 15), wo höchste SO_2-Immissionen festzustellen sind (Karte 5). Hohe Korrosionsraten in den Hochlagen des Schwarzwalds, im Harz oder im Raum Garmisch-Partenkirchen lassen jedoch auch den Einfluß der Ozon-Immission auf das Korrosionsverhalten von Kupfer erkennbar werden (Karte 7 und Karte 15).

5.1.4 Bronze (frei exponiert)

Auch für die aktuellen Korrosionsraten von Bronze ergab sich die Möglichkeit eines Vergleichs der mit unterschiedlichen Formeln berechneten Ergebnisse. Die mit der UBA-Funktion beziehungsweise der BLfD-Funktion erzielten Resultate stimmen wiederum recht gut überein (Karte 16 und Karte 17). Die Unterschiede zwischen den Funktionen machen sich bei Bronze stärker bemerkbar als bei Kupfer. Mit der Funktion des Umweltbundesamtes ergeben sich im Bereich der Maxima jährliche Korrosionsraten, die um 1 bis 2 g/m² höher

liegen als die mit der Funktion des BLfD ermittelten Werte. Bei Anwendung der UBA-Funktion liegen die Gebiete maximaler Korrosionsraten in den Gebieten höchster SO_2-Immissionen (Karte 16). Mit der BLfD-Funktion hingegen ergeben sich maximale Korrosionsraten im nordwestlichen Schleswig-Holstein und den vorgelagerten Inseln, den Gebieten mit höchsten Chlorid-Konzentrationen im Niederschlag (Karte 17). Die BLfD-Funktion mißt demgemäß dem Einfluß der Chlorid-Konzentration im Niederschlag etwas mehr Bedeutung zu, die Funktion des Umweltbundesamtes gewichtet die Wirkung hoher SO_2-Immissionen stärker. Dennoch ergeben sich bezüglich der räumlichen Verteilung der Gebiete erhöhter Korrosionsraten auch deutliche Übereinstimmungen.

Die UBA-Funktion für Bronze berücksichtigt die SO_2- und O_3-Immission, die Chloridkonzentration im Niederschlag, sowie die Protonenfracht. Die Korrosionsraten werden als jährlicher Massenverlust in g/m² angegeben.

UBA-Funktion für Bronze:

$$^{t}ML_{Bz(un)} = 2{,}83\ t^{0,6} + \{0{,}114\ [SO_2] + 0{,}41\ [Cl^-] + 0{,}015\ [O_3] + 20{,}9\ [H^+mm]\} \cdot t$$

Gemäß $ML = {}^{4}ML - {}^{3}ML$ ergibt sich für das vierte Jahr der Exposition:

$$ML_{Bz(un)} = 1{,}03 + 0{,}114\ [SO_2] + 0{,}41\ [Cl^-] + 0{,}015\ [O_3] + 20{,}9\ [H^+mm]$$

Bei Anwendung der vom Umweltbundesamt in Berlin berechneten Dosis-Wirkungsfunktion ergeben sich aktuelle Korrosionsraten zwischen 1,9 und 9,1 g/m² (Tabelle 4). Hohe Korrosionsraten treten in Gebieten hoher SO_2-Immission auf (Karte 5 und Karte 16). Darüber hinaus können hohe Korrosionsraten entlang der Nordseeküste festgestellt werden, da die UBA-Gleichung neben der SO_2- und O_3-Immission, der Protonenfracht auch die Chlorid-Konzentration im Niederschlag berücksichtigt.

Die vom Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege ermittelte Dosis-Wirkungsfunktion berücksichtigt die SO_2-Immission, die Chlorid-Konzentration im Niederschlag, die Relative Feuchte und die Protonenfracht. Die Ergebnisse werden auch hier als Massenverlust in g/m² angegeben.

BLfD-Funktion für Bronze:

$$ML_{Bz(un)} = (\text{INV Ln } (\{\text{Ln } [4] \cdot 0{,}80316 + [SO_2] \cdot 1{,}11996\text{E-}02 + [Cl^-] \cdot 8{,}36456\text{E-}02 + [H^+mm] \cdot 3{,}80722 + [Rh] \cdot 1{,}18279\text{E-}02\} + 0{,}57315) - (\text{INV Ln } (\{\text{Ln } [3] \cdot 0{,}80316 + [SO_2] \cdot 1{,}11996\text{E-}02 + [Cl^-] \cdot 8{,}36456\text{E} + [H^+mm] \cdot 3{,}80722 + [Rh] \cdot 1{,}18279\text{E-}02\} + 0{,}57315)$$

Bei Anwendung der BLfD-Funktion ergeben sich für das vierte Jahr der Exposition Korrosionsraten zwischen 2,8 und 7,6 g/m² (Tabelle 4). Maximale Korrosionsmassenverluste treten im nördlichen Schleswig-Holstein und den vorgelagerten Inseln der Nordsee auf. Der Chlorid-Konzentration im Niederschlag kommt als Ursache für Korrosionsmassenverluste große Bedeutung zu (Karte 9 und Karte 17). Daneben treten hohe Korrosionsraten in Gebieten maximaler SO_2-Belastung auf. Dies sind Sachsen, Thüringen, Sachsen-Anhalt, das Ruhrgebiet und der Raum Saarbrücken (Karte 5 und Karte 17).

5.1.5 Portland Kalkstein (frei exponiert)

Die UBA-Funktion für Portland Kalkstein berücksichtigt die SO_2-Immission, die Chloridkonzentration im Niederschlag, sowie die Protonenfracht. Aktuelle Korrosionsraten werden als jährliche Oberflächenrückweichung in µm angegeben.

UBA-Funktion für Portland Kalkstein:

$$^{t}ML_{Po(un)} = 5{,}34\, t^{0{,}6} + \{0{,}209\, [SO_2] + 0{,}80\, [Cl^-] + 30{,}8\, [H^+mm]\} \cdot t$$

Gemäß $ML = {}^{4}ML - {}^{3}ML$ ergibt sich für das vierte Jahr der Exposition:

$$ML_{Po(un)} = 1{,}95 + 0{,}209\, [SO_2] + 0{,}80\, [Cl^-] + 30{,}8\, [H^+mm]$$

Im vierten Jahr der Exposition liegen die aktuellen Korrosionsraten zwischen 2,4 und 15,6 µm Oberflächenrückweichung (Tabelle 4). Höchste Korrosionsraten treten in den Gebieten maximaler SO_2-Immission auf (Karte 5 und Karte 18). Diese liegen in Sachsen, Ostthüringen und im südlichen Sachsen-Anhalt. Des weiteren sind erhöhte Korrosionsraten im Ruhrgebiet und im Saarland zu verzeichnen, worin die Wirkung der in diesen Gebieten relativ hohen SO_2-Immission zum Tragen kommt. Hohe Korrosionsraten entlang der Nordseeküste sind auf die korrosive Wirkung hoher Chloridkonzentrationen im Niederschlag zurückzuführen (Karte 9 und Karte 18).

5.1.6 Mansfield Sandstein (frei exponiert)

Die UBA-Funktion für Mansfield Sandstein berücksichtigt die SO_2-Immission, die Chlorid-Konzentration im Niederschlag, sowie die Protonenfracht. Aktuelle Korrosionsraten werden als jährlicher Massenverlust in µm Oberflächenrückweichung angegeben.

$$^{t}ML_{Ma(un)} = 4{,}77\, t^{0{,}6} + \{0{,}229\, [SO_2] + 0{,}55\, [Cl^-] + 35{,}5\, [H^+mm]\} \cdot t$$

Gemäß $ML = {}^{4}ML - {}^{3}ML$ ergibt sich für das vierte Jahr der Exposition:

$$ML_{Ma(un)} = 1{,}74 + 0{,}229\, [SO_2] + 0{,}55\, [Cl^-] + 35{,}5\, [H^+mm]$$

Die Kartierung aktueller Korrosionsraten für Mansfield Sandstein führt zu ähnlichen Ergebnissen wie die für Portland Kalkstein. Maximale jährliche Massenverluste treten in Gebieten starker SO_2-Belastung de Luft auf. Hier werden bis zu 16,4 µm Oberflächenrückweichung pro Jahr verzeichnet (Tabelle 4 und Karte 19). Daneben sind in Gebieten erhöhter Chloridkonzentrationen im Niederschlag höhere aktuelle Korrosionsraten zu erwarten (Karte 9 und Karte 19).

5.2 Berechnung aktueller Korrosionsraten mit den vereinheitlichten ICP-Funktionen

Vereinheitlichte ICP-Funktionen stehen für insgesamt zwölf Materialien zur Verfügung. Die Ergebnisse der Berechnungen mit den ICP-Funktionen beziehen sich auf das achte Jahr der Exposition. Im Gegensatz zu den UBA- und BLfD-Funktionen berücksichtigen die ICP-Funktionen eine Temperaturabhängigkeit des Verwitterungsverhaltens der Materialien. Die Jahresmitteltemperatur findet nicht nur Eingang in jede ICP-Funktion, sie dient bei verschiedenen Materialien auch der Festlegung einer Grenztemperatur, oberhalb beziehungsweise unterhalb derer zur Berechnung aktueller Korrosionsraten unterschiedliche Funktionen hie

angezogen werden. Die jeweilige Grenztemperatur ist materialspezifisch. Für die hier verwendeten Materialien liegt sie zwischen 9 und 11 °C Jahresmitteltemperatur. Unterschiede zwischen der ICP-Funktion oberhalb beziehungsweise unterhalb dieser Grenztemperatur manifestieren sich innerhalb der Formeln jeweils in einer etwas anderen Gewichtung des Parameters Temperatur. Alle anderen Parameter bleiben innerhalb der jeweiligen Funktion unverändert.

Die Chloridkonzentration im Niederschlag findet im Gegensatz zu den UBA- und BLfD-Funktionen innerhalb der vereinheitlichten ICP-Funktionen nur in zwei Ausnahmefällen Berücksichtigung. Lediglich für die Berechnung aktueller Korrosionsraten der Materialien Aluminium und Bronze wird sie in Form des Parameters [RainCl] mit einbezogen. Der Parameter [RainCl] entspricht der Chloridfracht (mittlere jährliche Depositionsfracht von Cl).

Folgende Parameter werden von den vereinheitlichten ICP-Funktionen berücksichtigt:

- Klimatische Parameter:
  [Rain]: Mittlere jährliche Niederschlagssumme in mm
  [Rh]: Relative Luftfeuchte in %
  [$T-T_{lim}$]: Mittlere jährliche Lufttemperatur in °C abzüglich der materialspezifischen Grenztemperatur in °C
- Schadstoffparameter
  [SO_2]: Schwefeldioxid-Konzentration in µg/m³
  [O_3]: Ozon-Konzentration in µg/m³
  [H^+]: Protonenkonzentration im Niederschlag in mg/l
  [Cl^-]: Chloridkonzentration im Niederschlag in mg/l
  [RainH^+]: Protonenfracht in mg/m² (Mittlere jährliche Niederschlagssumme in mm multipliziert mit der mittleren Protonenkonzentration im Niederschlag in mg/l)
  [RainCl^-]: Chloridfracht in mg/m² (Mittlere jährliche Niederschlagssumme in mm multipliziert mit der mittleren Chloridkonzentration im Niederschlag in mg/l)

5.2.1 Verwitterungsbeständiger Stahl (frei exponiert)

Zur Berechnung aktueller Korrosionsraten verwitterungsbeständigen Stahls werden bei Anwendung der ICP-Funktion die Klimaparameter Temperatur und Relative Feuchte, sowie die SO_2-Immission berücksichtigt. In Gebieten, die eine Jahresmitteltemperatur von ≤ 10 °C aufweisen wird Gleichung (1) verwendet, liegt die Jahresmitteltemperatur über 10 °C kommt Gleichung (2) zur Anwendung. Die Korrosionsraten werden als jährlicher Massenverlust in g/m² angegeben.

Vereinheitlichte ICP-Funktion für Verwitterungsbeständigen Stahl:

$$\ln (ML) = 3{,}54 + 0{,}33 \ln(t) + 0{,}13 \ln [SO_2] + 0{,}02 [Rh] + 0{,}059 [T-10] \qquad T \leq 10°C \quad (1)$$

$$\ln (ML) = 3{,}54 + 0{,}33 \ln(t) + 0{,}13 \ln [SO_2] + 0{,}02 [Rh] - 0{,}036 [T-10] \qquad T > 10°C \quad (2)$$

Für das achte Jahr der Exposition ergeben sich aktuelle Korrosionsraten von 7,3 bis 22,8 g/m² (Tabelle 5). Die Minima liegen in den Alpen, dem bayerischen Alpenvorland, sowie in den Hochlagen von Bayerischem Wald, Schwarzwald und Schwäbischer Alb (Karte 20). Die höchsten Korrosionsraten liegen in Gebieten maximaler SO_2-Immission (Karte 5 und Karte 20). Diese liegen im wesentlichen in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen.

Es treten markante Unterschiede zu den Kartierungsergebnissen auf, die mit der UBA-Funktion für Verwitterungsbeständigen Stahl berechnet wurden. Im Bereich des Maximums sind die mit der UBA-Funktion erzielten Kartierungsergebnisse mehr als doppelt so hoch als die mit der vereinheitlichten ICP-Funktion ermittelten Werte. Eine Ursache dieses Unterschieds ist die Einbeziehung der Chloridkonzentration im Niederschlag durch die UBA-Funktion. Bei Anwendung der UBA-Funktion treten maximale Korrosionsraten in Gebieten höchster Chloridkonzentrationen im Niederschlag und nicht in den Regionen höchster SO_2-Immission auf (Karte 12). Doch auch in den Gebieten hoher SO_2-Immission werden hohe Korrosionsraten errechnet. Diese liegen, absolut betrachtet, in etwa im Bereich der maximalen Korrosionsraten wie sie mit der vereinheitlichten ICP-Funktion berechnet werden. Eine weitere Ursache für die deutlich höheren Ergebnisse der Berechnungen mit der UBA-Funktion liegt im unterschiedlichen Zeitbezug der beiden Funktionen. Während des achtjährigen Expositionsversuchs hatte sich gezeigt, daß in den ersten Jahren der Exposition eines Materials besonders hohe Korrosionsschäden auftreten. Mit zunehmender Expositionsdauer verlangsamen sich die Korrosionsprozesse. Da sich die Ergebnisse der Berechnungen mit der UBA-Funktion auf das vierte Jahr der Exposition, die der Berechnungen mit der ICP-Funktion aber auf das achte Jahr der Exposition beziehen, muß dieser Aspekt beim Vergleich der Kartierungsergebnisse berücksichtigt werden.

5.2.2 Zink (frei exponiert)

Bei Anwendung der vereinheitlichten ICP-Funktion für Zink werden die Klimaparameter Temperatur und Relative Feuchte, die SO_2-Immission, sowie die Protonenfracht berücksichtigt. In Gebieten, die eine Jahresmitteltemperatur von ≤ 10 °C aufweisen wird Gleichung (1) verwendet, liegt die Jahresmitteltemperatur über 10 °C kommt Gleichung (2) zur Anwendung. Die Korrosionsraten werden als jährlicher Massenverlust in g/m² angegeben.

Vereinheitlichte ICP-Funktion für Zink:

$$ML = 1{,}35\,[SO_2]^{0{,}22} \exp\{0{,}018\,[Rh] + 0{,}062\,[T\text{-}10]\}\, t^{0{,}85} + 0{,}029\,[RainH^+] \cdot t \qquad T \le 10°C \quad (1)$$

$$ML = 1{,}35\,[SO_2]^{0{,}22} \exp\{0{,}018\,[Rh] - 0{,}021\,[T\text{-}10]\}\, t^{0{,}85} + 0{,}029\,[RainH^+] \cdot t \qquad T > 10°C \quad (2)$$

Im achten Jahr der Exposition treten aktuelle Korrosionsraten zwischen 2,8 und 9,1 g/m² auf (Tabelle 5). Maximale Korrosionsraten werden in den Gebieten höchster SO_2-Immission festgestellt (Karte 5 und Karte 21). Dies sind neben Sachsen und Ostthüringen, das südliche Sachsen–Anhalt und das südliche Brandenburg. Auch Berlin und das Ruhrgebiet zeichnen sich durch erhöhte aktuelle Korrosionsraten aus. Geringe Korrosionsraten ergeben sich für Süddeutschland und große Teile Schleswig-Holsteins und Mecklenburg-Vorpommerns.

5.2.3 Aluminium (frei exponiert)

Für Aluminium steht lediglich die vom Swedish Corrosion Institute berechnete vereinheitlichte ICP-Funktion zur Verfügung. Sie berücksichtigt die SO_2-Immission, die Temperatur, sowie die Chloridfracht, die sich durch Multiplikation der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge in mm mit der Chlorid-Konzentration im Niederschlag in mg/l errechnet. In Gebieten, die eine Jahresmitteltemperatur von ≤ 10 °C aufweisen wird Gleichung (1) verwendet, liegt die Jahresmitteltemperatur über 10 °C kommt Gleichung (2) zur Anwendung. Die Kartierungsergebnisse werden als jährlicher Massenverlust in g/m² angegeben.

Vereinheitlichte ICP-Funktion für Aluminium:

$$ML = 0{,}0021[SO_2]^{0{,}23}\,[Rh]\,\exp\{0{,}031\,[T\text{-}10]\}\,t^{1,2} + 0{,}000023\,[RainCl^-]\cdot t \qquad T \le 10°C \quad (1)$$

$$ML = 0{,}0021[SO_2]^{0{,}23}\,[Rh]\,\exp\{-0{,}061\,[T\text{-}10]\}\,t^{1,2} + 0{,}000023\,[RainCl^-]\cdot t \qquad T > 10°C \quad (2)$$

Der Massenverlust liegt im achten Jahr der Exposition zwischen 0,23 und 0,76 g/m² (Tabelle 5). Geringe Massenverluste treten in weiten Teilen Bayerns und Baden-Württembergs auf. Hohe Massenverluste sind in den industriellen Ballungsräumen Sachsens, Sachsen-Anhalts und Thüringens zu erwarten, wo die maximalen SO_2-Immissionen zu verzeichnen sind (Karte 5 und Karte 22). Erhöhte Korrosionsraten entlang der Nordseeküste sind auf die Einwirkung erhöhter Chlorid-Konzentrationen im Niederschlag, erhöhte Korrosionsraten im Ruhrgebiet auf hohe SO_2-Immissionen zurückzuführen.

Tabelle 5: Statistik zu den Ergebnissen der Berechnungen mit den ICP-Funktionen

Material	Einheit	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard-abweichung
Verwitterungsbeständiger Stahl	g/m²	7,3	22,8	18,2	1,6
Zink	g/m²	2,8	9,1	6,3	0,9
Aluminium	g/m²	0,23	0,76	0,52	0,08
Kupfer	g/m²	2,0	9,6	5,2	1,1
Bronze	g/m²	1,3	7,7	4,0	1,1
Portland Kalkstein	µm	2,5	16,3	7,2	2,4
Mansfield Sandstein	µm	1,5	13,0	5,6	2,1
Alkyd-Melamin-Anstrich auf verzinktem Stahlblech	ASTM	0,4	5,8	4,7	0,5
Silizium-Alkyd-Anstrich auf Stahlplatten	ASTM	2,1	7,6	6,2	0,95
Nickel	µg/cm²	1	1136	192	193
Zinn	µg/cm²	2,0	13,1	8,1	0,8
Glas	nm	2076	17800	7066	2231

5.2.4 Kupfer (frei exponiert)

Die ICP-Funktion für Kupfer berücksichtigt die SO_2- und O_3-Immission, die Relative Feuchte und die Protonenfracht. In Gebieten, die eine Jahresmitteltemperatur von ≤ 10 °C aufweisen wird Gleichung (1) verwendet, liegt die Jahresmitteltemperatur über 10 °C kommt

Gleichung (2) zur Anwendung. Die Kartierungsergebnisse werden als jährlicher Korrosionsmassenverlust in g/m² angegeben.

Vereinheitlichte ICP-Funktion für Kupfer:

$$ML = 0{,}0027\,[SO_2]^{0{,}32}\,[O_3]^{0{,}79}\,[Rh]\,\exp\{0{,}083\,[T-10]\}\,t^{0{,}78} + 0{,}05\,[RainH^+]\,t^{t^{0{,}89}} \qquad T \le 10° \quad (1)$$

$$ML = 0{,}0027\,[SO_2]^{0{,}32}\,[O_3]^{0{,}79}\,[Rh]\,\exp\{-0{,}032\,[T-10]\}\,t^{0{,}78} + 0{,}05\,[RainH^+]\,t^{0{,}89} \qquad T > 10° \quad (2)$$

Die berechneten Korrosionsmassenverluste liegen im achten Jahr der Exposition zwischen 2,0 und 9,6 g/m² (Tabelle 5). Maximale Massenverluste treten in Sachsen auf (Karte 23). Wiederum sind hohe Korrosionsraten an hohe SO_2-Immissionsraten gebunden (Karte 5 und Karte 23). Daß die Ozon-Immission für die Korrosion von Kupfer auch im achten Jahr der Exposition noch von Bedeutung ist, wird an den erhöhten Korrosionsraten in den Hochlagen des Schwarzwaldes deutlich. Dies läßt sich aus dem Vergleich der Kupfer-Korrosionskarte (Karte 23) mit der Karte der mittleren Ozon-Immission ableiten (Karte 7). Geringe Korrosionsraten treten in weiten Teilen Süddeutschlands und in Nordwestdeutschland auf.

5.2.5 Bronze (frei exponiert)

Bei Anwendung der Vereinheitlichten ICP-Funktion für Bronze werden die SO_2-Immission, die Relative Feuchte, sowie die Chlorid- und Protonenfrachten berücksichtigt. In Gebieten, die eine Jahresmitteltemperatur von ≤ 11 °C aufweisen wird Gleichung (1) verwendet, liegt die Jahresmitteltemperatur über 11 °C kommt Gleichung (2) zur Anwendung. Die Kartierungsergebnisse werden als Korrosionsmassenverlust in g/m² angegeben.

Vereinheitlichte ICP-Funktion für Bronze:

$$ML = 0{,}026\,[SO_2]^{0{,}44}\,[Rh]\,\exp\{0{,}06\,[T-11]\}\,t^{0{,}86} + (0{,}029\,[RainH^+] + 0{,}00043\,[RainCl^-]\,t^{0{,}76} \qquad T \le 11°C \quad (1)$$

$$ML = 0{,}026\,[SO_2]^{0{,}44}\,[Rh]\,\exp\{-0{,}067\,[T-11]\}\,t^{0{,}86} + (0{,}029\,[RainH^+] + 0{,}00043\,[RainCl^-]\,t^{0{,}76} \qquad T > 11°C \quad (2)$$

Für das achte Jahr der Exposition errechnen sich aktuelle Korrosionsraten von 1,3 bis 7,7 g/m² (Tabelle 5). Maximalwerte werden in Sachsen, Ostthüringen und m südlichen Sachsen-Anhalt erreicht (Karte 24). Hohe Korrosionsraten sind wiederum an Gebiete hoher, geringe Korrosionsraten an Gebiete geringer SO_2-Belastung der Luft gebunden (Karte 5). Vor allem im süddeutschen Raum werden geringe aktuelle Korrosionsraten festgestellt. Darüber hinaus treten geringe Korrosionsraten im mittleren Mecklenburg-Vorpommern und nördlichen Brandenburg, sowie im zentralen und nordwestlichen Rheinland-Pfalz auf.

5.2.6 Portland Kalkstein (frei exponiert)

Die vereinheitlichte ICP-Funktion für Portland Kalkstein berücksichtigt die SO_2-Immission, die Temperatur und die Protonenfracht. Die Ergebnisse der Berechnungen werden in Oberflächenrückweichung in µm angegeben. Für Portland Kalkstein konnten keine ausgeprägten Unterschiede im Verwitterungsverhalten zwischen relativ warmen und verhältnismäßig kühlen Regionen festgestellt werden. Infolgedessen wurde keine Grenztemperatur definiert.

Vereinheitlichte ICP-Funktion für Portland Kalkstein:

$$R = t^{0,96} (2,7 [SO_2]^{0,48} \exp\{-0,018 T\} + 0,019 [RainH^+])$$

Die aktuellen Korrosionsraten liegen im achten Jahr der Exposition zwischen 2,5 und 16,3 µm Oberflächenrückweichung (Tabelle 5). Maximalwerte werden in Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt erreicht (Karte 25). Die SO_2-Immission ist für die Korrosion von Portland Kalkstein von größter Bedeutung. Relativ geringe Korrosionsraten von < 6 g/m² und Jahr sind für den süddeutschen Raum, große Teile Schleswig-Holsteins, das zentrale Mecklenburg-Vorpommern, sowie Teile des Bundeslandes Rheinland-Pfalz zu erwarten.

5.2.7 Mansfield Sandstein (frei exponiert)

Ein ähnliches Bild ergeben die Berechnungen mit der vereinheitlichten ICP-Funktion für Mansfield Sandstein. Wiederum lassen sich maximale Werte jährlicher Oberflächenrückwechung in den Gebieten höchster SO_2-Immission (Karte 26) feststellen. Hier werden bis zu 13 µm Oberflächenrückweichung im Jahr erreicht (Tabelle 5). Geringe Korrosionsraten können auch hier für den süddeutschen Raum, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern konstatiert werden. Darüber hinaus treten nun aber auch geringe Korrosionsraten in größeren Teilen Niedersachsens, sowie im Grenzgebiet der Bundesländer Hessen, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz auf.

Die vereinheitlichte ICP-Funktion bezieht die SO_2-Immission und die Protonenfracht mit ein. Alle Ergebnisse werden in µm Oberflächenrückweichung im Jahr angegeben.

Vereinheitlichte ICP-Funktion für Mansfield Sandstein:

$$R = t^{0,91} (2,0 [SO_2]^{0,52} + 0,028 [RainH^+]) \qquad T \le 10°C \quad (1)$$

$$R = t^{0,91} (2,0 [SO_2]^{0,52} \exp\{-0,013 [T-10]\} + 0,028 [RainH^+]) \qquad T > 10°C \quad (2)$$

5.2.8 Alkyd-Melamin-Anstrich auf verzinktem Stahlblech (frei exponiert)

Bei der Kartierung der Korrosionsraten für Anstriche wird von der ansonsten angewandten Vorgehensweise - Berechnung einer aktuellen Korrosionsrate anhand der Korrosionsrate im achten Jahr der Exposition - abgewichen. Statt dessen wird das Ausmaß der Schädigung der Anstriche nach zehnjähriger Expositionsdauer berechnet und kartiert. Zu Beginn des Expositionszeitraums wird den Materialproben ein künstlicher Schaden in Form eines Kratzers zugefügt. Anschließend wird der Verlauf der Schädigung des Anstrichs im bereich dieses Kratzers und an den unbeschädigten Stellen des Probenmaterials beobachtet. Nach achtjähriger Expositionsdauer ist in den Bereichen der Probe, die von der künstlichen Schädigung durch den Kratzer nicht betroffen waren, keine Schädigung in Form eines etwaigen Dickverlusts festzustellen (UN ECE 1998). Zur Ableitung von Dosis-Wirkungsbeziehungen werden daher die Schäden herangezogen, die im Bereich des Kratzers festzustellen sind. Die auftretenden Korrosionsschäden werden in der Einheit ASTM (ein materialspezifischer Standard, festgelegt von der American Society for Testing and Materials) angegeben. Der Grad der Schädigung des Anstrichs wird gemäß den Ergebnissen einer visuellen Beurteilung der Materialprobe festgelegt. Niedrige ASTM-Werte stehen für eine starke Schädigung des Materials, hohe ASTM-Werte kennzeichnen geringe Schäden. Die Lebensdauer des jeweil

gen Materials ist bei ASTM = 5 erreicht. Die Kennzeichnung der Lebensdauer eines Materials als gemäß dieses Kriteriums ist allgemein akzeptiert (UN ECE 1998).

Die vereinheitlichte ICP-Funktion für Alkyd-Melamin-Anstrich auf verzinktem Stahlblech berücksichtigt die SO_2-Immission, sowie die klimatischen Faktoren Relative Feuchte, Temperatur und Niederschlag. Für die Schädigung des Alkyd-Melamin-Anstrichs auf verzinktem Stahlblech spielen klimatische Faktoren, und hierbei vor allem die jährliche Niederschlagssumme, eine bedeutende Rolle.

Vereinheitlichte ICP-Funktion für Alkyd-Melamin-Anstriche auf verzinktem Stahlblech:

$$ASTM = 10 - (t^{0,43} (0{,}0084 [SO_2] + 0{,}015 [Rh] + 0{,}04 [T\text{-}10] + 0{,}00082 [Rain])) \quad T \leq 10°C \quad (1)$$

$$ASTM = 10 - (t^{0,43} (0{,}0084 [SO_2] + 0{,}015 [Rh] - 0{,}064 [T\text{-}10] + 0{,}00082 [Rain])) \quad T > 10°C \quad (2)$$

Die Lebensdauer des Alkyd-Melamin-Anstrichs auf verzinktem Stahlblech ist nach zehnjähriger Expositionsdauer in einigen hochgelegenen Regionen Deutschlands bereits deutlich überschritten (Karte 27). Im Alpenraum, im Schwarzwald und im Harz, Teilen des Bayerischen Walds, des Hunsrücks, im Bergischen Land sowie im Thüringer Wald und Erzgebirge treten ASTM-Werte auf, die unter dem Lebensdauer-Kriterium ASTM = 5 liegen. Die genannten Regionen zeichnen sich durch hohe jährliche Niederschlagssummen sowie durch relativ niedrige Jahresdurchschnitts-temperaturen aus. Relativ geringe Schäden können für den niederschlagsarmen Nordosten Deutschlands, die Tallandschaften von Rhein und Donau, sowie einige ebenso niederschlagsarme wie wärmebegünstigte Beckenlandschaften des Mittelgebirgsgürtels (Wetterau, Mainfränkisches Becken) konstatiert werden. Der Einfluß der SO_2-Immission auf das Korrosionsverhalten von Alkyd-Melamin-Anstrichen auf verzinktem Stahlblech kommt in den niedrigen ASTM-Werten in Sachsen zum Ausdruck.

5.2.9 Siliziumalkyd-Anstrich auf Stahlplatten (frei exponiert)

Die Schädigung von Siliziumalkyd-Anstrichen auf Stahlplatten hingegen zeigt eine enge Bindung an die Regionen hoher SO_2-Immission. Die Lebensdauer des Anstrichs (ASTM = 5) ist nach zehn Jahren Expositionsdauer in erster Linie in Gebieten maximaler SO_2-Belastung überschritten (Karte 28). Sachsen, Thüringen, Sachsen-Anhalt, der gesamte Süden Brandenburgs und große Teile Berlins sind hiervon betroffen. Daneben sind im Ruhrgebiet und im Raum Saarbrücken stärkere Schädigungen zu erwarten. Große Teile Deutschlands zeichnen sich durch ein verhältnismäßig geringes Ausmaß der Schädigung aus (Karte 28).

Die vereinheitlichte ICP-Funktion für Siliziumalkyd-Anstriche auf Stahlplatten beziehen neben der SO_2-Immission die Relative Luftfeuchte, die Jahresdurchschnittstemperatur und die durchschnittliche jährliche Protonenfracht mit ein. Die Grenztemperatur, oberhalb derer Gleichung (2) Verwendung findet liegt bei 11 °C.

Vereinheitlichte ICP-Funktion für Silizium-Alkyd-Anstriche auf Stahlplatten:

$$ASTM = 10 - (t^{0,41} (0{,}033 [SO_2] + 0{,}013 [Rh] + 0{,}015 [T\text{-}11] + 0{,}0013 [RainH^+])) \quad T \leq 11°C \quad (1)$$

$$ASTM = 10 - (t^{0,41} (0{,}033 [SO_2] + 0{,}013 [Rh] - 0{,}15 [T\text{-}11] + 0{,}0013 [RainH^+])) \quad T > 11°C \quad (2)$$

5.2.10 Nickel (in geschützter Form exponiert)

Die vereinheitlichten ICP-Funktionen für elektrische Kontaktmaterialien haben für in geschützter Form exponierte Materialien Gültigkeit. In geschützter Form exponierte Materialien zeichnen sich im Gegensatz zu den ungeschützt exponierten Materialien durch eine Gewichtszunahme während des Expositionszeitraums aus. Ursache hierfür ist der in geschützter Form nicht auftretende „washing-„-Effekt. Korrosionsprodukte bleiben dadurch in stärkerem Maße an den Materialien haften. Die Gewichtszunahme, hier gemessen in µg/cm², dient als Maß für die Schädigung eines Materials.

Die vereinheitlichte ICP-Funktion für das elektrische Kontaktmaterial Nickel bezieht die SO_2-Immission und die Jahresdurchschnittstemperatur in die Berechnungen mit ein. In Gebieten, die eine Jahresmitteltemperatur von ≤ 9 °C aufweisen wird Gleichung (1) verwendet, liegt die Jahresmitteltemperatur über 9 °C kommt Gleichung (2) zur Anwendung.

Vereinheitlichte ICP-Funktion für Nickel:

$$\ln(WI) = 2{,}13 + \ln(t) + 1{,}19 \ln [SO_2] + 0{,}171\,[T\text{-}9] \qquad T \leq 9°C \quad (1)$$

$$\ln(WI) = 2{,}13 + \ln(t) + 1{,}19 \ln [SO_2] - 0{,}047\,[T\text{-}9] \qquad T > 9° \quad (2)$$

Für Nickel ist im achten Jahr der Exposition mit einer Gewichtszunahme von bis zu 1136 µg/cm² zu rechnen (Tabelle 5). Maximalwerte werden in Regionen starker SO_2-Belastung festgestellt (Karte 29). In weiten Teilen Deutschlands sind relativ geringe jährliche Gewichtszunahmen von 1-200 µg/cm² zu erwarten.

5.2.11 Zinn (in geschützter Form exponiert)

Auch für das elektrische Kontaktmaterial Zinn dient die Gewichtszunahme (µg/cm²) während des Zeitraums der Exposition (sheltered) als Maß für den Grad der Schädigung. Es konnten keine ausgeprägten Unterschiede im Korrosionsverhalten zwischen relativ warmen und verhältnismäßig kühlen Regionen festgestellt werden, so daß auf die Einführung einer Grenztemperatur und damit auf die Angabe einer zweiten Formel verzichtet werden konnte. Die vereinheitlichte ICP-Funktion berücksichtigt neben dem Klimaparameter Temperatur lediglich die Ozon-Immission.

Vereinheitlichte ICP-Funktion für Zinn:

$$\ln(WI) = -0{,}7 + \ln(t) + 0{,}47 \ln [O_3] + 0{,}11\,[T]$$

Die Gewichtszunahme bewegt sich im achten Jahr der Exposition zwischen 2 und 13,1 µg/cm² (Tabelle 5). Relativ starke Gewichtszunahmen und damit Schädigungen sind vornehmlich in wärmebegünstigten Regionen Deutschlands, sowie in einigen Gebieten mit hoher Ozon-Immission zu erwarten. So zeichnen sich das Mittelrheintal, die Oberrheinische Tiefebene, die Niederrheinische Bucht oder auch das Neckarbecken sowohl durch relativ hohe Jahresmitteltemperaturen als auch durch verhältnismäßig starke Gewichtszunahmen des Materials Zinn aus (Karte 2 und Karte 30). Der Raum Garmisch-Partenkirchen und das Gebiet nördlich Berlins hingegen sind nicht wärmebegünstigt, dennoch treten größere Gewichtszunahmen auf. Diese sind in Verbindung zu bringen mit den in diesen Gebieten auftretenden hohen Ozon-Konzentrationen der Luft (Karte 7 und Karte 30).

5.2.12 Glas (frei exponiert)

Die vereinheitlichte ICP-Funktion für Glas berechnet aktuelle Korrosionsraten unter Einbeziehung der SO_2-Immission und des Klimaparameters Relative Feuchte. Als Maß für die Schädigung dient die Tiefe der ausgelaugten oberflächennahen Schicht in nm. Es wurde keine Grenztemperatur definiert.

Vereinheitlichte ICP-Funktion für Glas:

$$LL = 0{,}013\,[SO_2]^{0{,}49}\,[Rh]^{2{,}75} \cdot t$$

Die Tiefe der ausgelaugten Schicht schwankt im achten Jahr der Exposition zwischen 2075 und 17800 nm (Tabelle 5). Starke Schädigungen treten wiederum hauptsächlich in Gebieten hoher SO_2-Immissionen auf (Karte 5 und Karte 31). Im süddeutschen Raum sind relativ geringe Korrosionsschäden an Glas zu erwarten.

5.3 Abschließende Bemerkungen zur Kartierung aktueller Korrosionsraten mit unterschiedlichen Dosis-Wirkungsfunktionen

Die Kartierung aktueller Korrosionsraten mit unterschiedlichen Dosis-Wirkungsfunktionen führt zu Ergebnissen, die sowohl hinsichtlich der Höhe der ermittelten Werte als auch hinsichtlich deren räumlicher Verteilung gut übereinstimmen. Vor allem für die Materialien Kupfer und Bronze, aber auch für Zink, Portland Kalkstein und Mansfield Sandstein können große Übereinstimmungen festgestellt werden.

Unterschiede bei der Berechnung aktueller Korrosionsraten für ein Material mit verschiedenen Dosis-Wirkungsfunktionen resultieren im wesentlichen aus der Berücksichtigung unterschiedlicher Klima- oder Schadstoffparameter. So ergeben sich bei der Berechnung aktueller Korrosionsraten verwitterungsbeständigen Stahls mit der UBA-Funktion beziehungsweise der vereinheitlichten ICP-Funktion hinsichtlich Höhe und räumlicher Verteilung der ermittelten Werte starke Unterschiede. Im Maximum liegen die Ergebnisse der Berechnungen mit der UBA-Funktion um den Faktor zwei höher als die mit der ICP-Funktion erzielten Resultate. Die unterschiedlichen Ergebnisse lassen sich aus der Form der jeweils verwendeten Dosis-Wirkungsfunktion schlüssig erklären. So bezieht die UBA-Funktion im Gegensatz zur ICP-Funktion die Chloridkonzentration im Niederschlag in Berechnungen mit ein.

Für die meisten der untersuchten Materialien läßt sich eine starke Abhängigkeit des Korrosionsverhaltens von der SO_2-Immission im jeweiligen Raum konstatieren. Lediglich bei der Berechnung aktueller Korrosionsraten für Zinn findet die SO_2-Immission keine Berücksichtigung.

Bei der Interpretation der Karten aktueller Korrosionsraten muß bedacht werden, daß diese letztendlich zwar auf gemessenen Werten verschiedener Klima- und Schadstoffparameter basieren, die räumliche Genauigkeit der ermittelten Korrosionsraten aber in starkem Maße von der Dichte der zu den Interpolationen der Klima- und Schadstoffkarten herangezogenen Meßnetze abhängt. So basiert die Karte der mittleren SO_2-Immission 1993-1995 (Karte 5) auf der räumlichen Interpolation der Daten von circa 500 Meßstationen in Deutschland (Karte 4 und Tabelle 3). Das SO_2-Meßnetz ist relativ dicht, die räumliche Genauigkeit der interpolierten SO_2-Werte daher verhältnismäßig groß. Für die Interpolation der Karte der mittleren Ozon-Konzentration der Jahre 1993, 1994 und 1995 stehen lediglich die Meßwerte

von jeweils circa 100 bis 200 Meßstationen zur Verfügung. Die Datenbasis der interpolierten Karten ist deutlich schmäler, die räumliche Genauigkeit der ermittelten Werte mithin geringer. Angesichts der Bedeutung der SO_2-Immission für die Berechnung und Kartierung aktueller Korrosionsraten ist die verhältnismäßig breite Datenbasis der interpolierten SO_2-Werte von Vorteil. Dennoch sollte bei der Interpretation der Karten nie die den Berechnungen zugrunde liegende Datenbasis aus dem Auge verloren werden.

6 Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten

Die Darstellung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten beschränkt sich auf die mit den ICP-Funktionen berechneten Kartierungsergebnisse, da sich, wie auf dem UN ECE Workshop on Quantification of Effects of Air Pollutants on Materials vom 25.-27. Mai 1998 in Berlin beschlossen, alle noch ausstehenden Untersuchungen auf die mit den vereinheitlichten ICP-Funktionen berechneten Ergebnisse beziehen werden.

Wie in Kapitel 1 ausgeführt errechnen sich akzeptable Korrosionsraten (K_{acc}) gemäß $K_{acc} = n \cdot K_{10}$ aus den jeweiligen Hintergrundkorrosionsraten (K_{10}) der Materialien. Für den Faktor „n“ werden Werte zwischen 1,2 und 3 empfohlen (UMWELTBUNDESAMT 1996; UN ECE 1998). In Tabelle 6 sind alle bis dato zur Verfügung stehenden Hintergrundkorrosionsraten zusammen mit verschiedenen daraus errechneten akzeptablen Korrosionsraten dargestellt. Zur Berechnung akzeptabler Korrosionsraten werden die Faktoren n=1,5, n=2 und n=3 verwendet. Lediglich für sieben der zwölf Materialien ist die Kartierung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten bisher möglich. Dies sind Verwitterungsbeständiger Stahl, Zink, Aluminium, Kupfer, Bronze, Portland Kalkstein und Mansfield Sandstein. Die Daten zu den Hintergrundkorrosionsraten stammen aus (UN ECE 1998). Für die Materialien Nickel, Zinn, Glas und die beiden Anstrichsysteme stehen keine Daten zu den Hintergrundkorrosionsraten zur Verfügung. Folglich können für diese Materialien keine akzeptablen Korrosionsraten berechnet werden.

Die Hintergrundkorrosionsraten der Materialien Verwitterungsbeständiger Stahl, Zink, Aluminium, Kupfer und Bronze liegen in der Einheit Oberflächenrückweichung in µm vor. Über die Dichte können sie in die Einheit Massenverlust in g/m² umgerechnet werden. Die Hintergrundkorrosionsraten der Materialien Portland Kalkstein und Mansfield Sandstein liegen bereits in der Einheit Oberflächenrückweichung in µm vor. Somit liegen die Werte zu den Hintergrundkorrosionsraten jeweils in denselben Einheiten vor wie die Ergebnisse der Berechnungen zu den aktuellen Korrosionsraten.

Ausgehend von den Hintergrundkorrosionsraten werden für diese sieben Materialien akzeptable Korrosionsraten berechnet. Dabei werden jeweils die Parameter n = 3, n = 2 und n = 1,5 verwendet. Anschließend kann die prozentuale Überschreitung der verschiedenen akzeptablen Korrosionsraten kartiert werden. Die Kartierung soll klären, wo Überschreitungen auftreten und welches Ausmaß diese Überschreitungen annehmen. Darüber hinaus soll geprüft werden, welche Konsequenzen sich aus der Anwendung unterschiedlich hoher akzeptabler Korrosionsraten für die räumliche Verteilung und Höhe der Überschreitungen ergeben. Tabelle 6 zeigt die Hintergrundkorrosionsraten und die daraus berechneten akzeptablen Korrosionsraten der einzelnen Materialien.

Tabelle 6: Hintergrundkorrosionsraten (frei exponiert) und akzeptable Korrosionsraten

Hintergrundkorrosionsraten und akzeptable Korrosionsraten*							
	Verwitterungs-beständiger Stahl (g/m²)	Zink (g/m²)	Alu-minium (g/m²)	Kupfer (g/m²)	Bronze (g/m²)	Portland Kalkstein (µm)	Mansfield Sandstein (µm)
Hintergrund-korrosionsrate[5] (n = 1)	7,87	3,5	0,3	2,3	1,8	3,5	3,2
Akzeptable Korrosionsrate (n = 1,5)	11,8	5,25	0,45	3,45	2,7	5,3	4,8
Akzeptable Korrosionsrate (n = 2)	15,74	7,0	0,6	4,6	3,6	7,0	6,4
Akzeptable Korrosionsrate (n = 3)	23,61	10,5	0,9	6,9	5,4	10,5	9,6

* Korrosionsraten in g/m² (Massenverlust) bzw. µm (Oberflächenrückweichung)

6.1 Verwitterungsbeständiger Stahl – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten

Die Ergebnisse der Kartierung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten verwitterungsbeständigen Stahls sind Karte 32, Karte 33 und Karte 34, sowie Tabelle 7 zu entnehmen. Tabelle 7 zeigt die prozentualen Flächenanteile einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korrosionsraten. Der Flächenanteil der Gebiete mit Unterschreitung der jeweiligen akzeptablen Korrosionsrate steigt von 0,2 % bei Anwendung der mit n = 1,5 berechneten akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(1,5)$, über 4,3 % bei Anwendung von $K_{acc}(2)$, um schließlich bei Anwendung von $K_{acc}(3)$ 100 % zu erreichen.

Karte 32 zeigt die räumliche Verteilung der Gebiete mit Über- beziehungsweise Unterschreitung der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(1,5)$. Kleinräumige Unterschreitungen um bis zu 39 % sind lediglich in Teilen der Alpen zu erkennen. In weiten Teilen Süddeutschlands liegen die aktuellen Korrosionsraten zwischen 25 und 50 % über der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(1,5)$. In der Nordhälfte Deutschlands sind Überschreitungen zwischen 50 und 100 % weit verbreitet. Nur in Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern gibt es größere zusammenhängende Gebiete, in denen die Überschreitungen zwischen 25 und 50 % liegen.

Erfolgt die Kartierung anhand der mit dem Faktor n = 2 berechneten akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(2)$, so lassen sich großräumig Überschreitungen der akzeptablen Korrosionsrate um 0 bis 25 % feststellen (Karte 33). Knapp 80 % der Gesamtfläche der BRD liegt im Bereich von Überschreitungen dieses Ausmaßes. In Gebieten, die sich durch eine hohe SO_2-Immission auszeichnen, treten Überschreitungen der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(2)$ um

[5] Hintergrundkorrosionsraten gemäß UN ECE 1998

bis zu 44 % auf. Auf lediglich 4,3 % der Fläche der BRD wird die akzeptable Korrosionsrate $K_{acc}(2)$ unterschritten. Die Gebiete mit Unterschreitungen konzentrieren sich auf den Süden Bayerns, den Bayerischen Wald, sowie Teile des Schwarzwalds und der Schwäbischen Alb. Hier liegen die aktuellen Korrosionsraten um bis zu 54 % unter der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(2)$.

Verwendet man den Faktor n = 3 zur Berechnung der akzeptablen Korrosionsrate ($K_{acc}(3)$), so kann für ganz Deutschland eine Unterschreitung der akzeptablen Korrosionsrate konstatiert werden (Karte 34).

Tabelle 7: Verwitterungsbeständiger Stahl - Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korrosionsraten

Verwitterungsbeständiger Stahl

Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korosionsraten

Überschreitung in %	$K_{acc}(1,5)$	$K_{acc}(2)$	$K_{acc}(3)$
keine	0,2	4,3	100
0 -< 25	1,4	79,7	-
25 -< 50	36,1	16	-
50 -< 100	62,3	-	-

6.2 Zink – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten

Die Ergebnisse der Kartierung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten für das Material Zink sind Karte 35, Karte 36 und Karte 37, sowie Tabelle 8 zu entnehmen. Erfolgt die Kartierung anhand der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(1,5)$, so können in Gebieten hoher SO_2-Immission Überschreitungen der akzeptablen Korrosionsrate um bis zu 73 % festgestellt werden (Karte 35). Überschreitungen um mehr als 50 % treten vornehmlich in Sachsen auf. In großen Teilen Nordrhein-Westfalens, in Hamburg, im Raum Bremerhaven, sowie in Teilen des Saarlands übertreffen die aktuellen Korrosionsraten die akzeptable Korrosionsrate $K_{acc}(1,5)$ um bis zu 25 %. Unterschreitungen der akzeptablen Korrosionsrate konzentrieren sich im süddeutschen Raum. Sie nehemen 9 % der Fläche der BRD ein (Tabelle 8).

Erfolgt die Kartierung anhand der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(2)$, so resultieren in den Gebieten hoher SO_2-Immissionen Überschreitungen um bis zu 30 % (Karte 36). Diese Gebiete umfassen neben Sachsen Teile der Bundesländer Thüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Berlin und Nordrhein-Westfalen. Auf 81 % der Fläche der BRD unterschreiten die aktuellen Korrosionsraten die akzeptable Korrosionsrate $K_{acc}(2)$. Es treten Unterschreitungen um bis zu 59 % auf.

Wird der Faktor n = 3 zur Berechnung der akzeptablen Korrosionsrate herangezogen, so treten Gebiete mit Überschreitungen der akzeptablen Korrosionsrate ganz zurück. Die ak-

zeptable Korrosionsrate $K_{acc}(3)$ wird in Teilen Deutschlands um bis zu 73 % unterschritten (Karte 37).

Tabelle 8: Zink – Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korrosionsraten

Zink Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korosionsraten			
Überschreitung in %	$K_{acc}(1,5)$	$K_{acc}(2)$	$K_{acc}(3)$
keine	9	81	100
0 -< 25	64,3	18,7	-
25 -< 50	19,8	0,3	-
50 -< 100	6,8	-	-

6.3 Aluminium – Überschreitung akzeptabler Korrosion s-raten

Die Ergebnisse der Kartierung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten für das Material Aluminium sind Karte 38, Karte 39 und Karte 40 sowie Tabelle 9 zu entnehmen. Auch bei der Kartierung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten für Aluminium sind maximale Überschreitungen in Gebieten festzustellen, die sich durch hohe SO_2-Immission auszeichnen. Die akzeptable Korrosionsrate $K_{acc}(1,5)$ wird in diesen Gebieten um bis zu 67 % überschritten (Karte 38). Zudem treten deutliche Überschreitungen der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(1,5)$ in den Küstengebieten der Nordsee auf. Dies ist auf die korrosive Wirkung erhöhter Chloridkonzentrationen im Niederschlag zurückzuführen. Erneut liegen die Gebiete mit Unterschreitungen der akzeptablen Korrosionsrate vornehmlich in Süddeutschland. $K_{acc}(1,5)$ wird hier um bis zu 48 % unterschritten. Die Gebiete mit Unterschreitung der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(1,5)$ nehmen 16,1 % der Fläche der BRD ein (Tabelle 9).

Die akzeptable Korrosionsrate $K_{acc}(2)$ wird großräumig um bis zu 61 % unterschritten (Karte 39). Lediglich auf 16 % der Fläche der BRD treten Überschreitungen der akzeptablen Korrosionsrate auf (Tabelle 9). Diese erreichen im Maximum 25 %.

Erfolgt die Kartierung anhand der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(3)$, so können keine Überschreitungen der akzeptablen Korrosionsrate mehr festgestellt werden (Karte 40). Die aktuellen Korrosionsraten liegen zwischen 16% und 74 % unter der akzeptablen Korrosionsrate (Tabelle 9).

Tabelle 9: Aluminium – Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korrosionsraten

Aluminium Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korosionsraten			
Überschreitung in %	$K_{acc}(1,5)$	$K_{acc}(2)$	$K_{acc}(3)$
keine	16,1	84	100
0 -< 25	59,7	16	-
25 -< 50	20,4	-	-
50 -< 100	3,8	-	-

6.4 Kupfer – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten

Die Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten für das Material Kupfer erreicht deutlich höhere Werte als dies bei den bisher behandelten Materialien festgestellt werden konnte. Auf 8 % der Fläche der BRD wird die akzeptable Korrosionsrate $K_{acc}(1,5)$ um mehr als 100 % überschritten (Tabelle 10). Im Maximum wird eine Überschreitung um 180 % erreicht. Gebiete starker Überschreitung der akzeptablen Korrosionsrate liegen in Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen und im Südosten Hessens (Karte 41). In großen Teilen Deutschlands liegen die aktuellen Korrosionsraten um mehr als 50 % über der akzeptablen Korrosionsrate. Unterschritten wird die $K_{acc}(1,5)$ nur noch in kleineren Gebieten Bayerns und Baden-Württembergs. Diese Gebiete nehmen lediglich 1,1 % der Gesamtfläche der BRD ein (Tabelle 10).

Selbst bei Anwendung der mit dem Faktor n = 2 berechneten akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(2)$ werden noch Überschreitungen um bis zu 110 % festgestellt (Karte 42). Erst bei der Kartierung mit der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(3)$ treten großflächig Unterschreitungen auf (Karte 43). In Sachsen können aber selbst dann noch Überschreitungen der akzeptablen Korrosionsrate um bis zu 40 % auftreten.

Tabelle 10:Kupfer - Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korrosionsraten

Kupfer Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korosionsraten			
Überschreitung in %	$K_{acc}(1,5)$	$K_{acc}(2)$	$K_{acc}(3)$
keine	1,1	26,3	91,5
0 -< 25	17,8	49,5	8,3
25 -< 50	36,5	16,2	0,2
50 -< 100	36,6	8	-
> 100	8	0,04	-

6.5 Bronze – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten

Bei Bronze wird die akzeptable Korrosionsrate $K_{acc}(1,5)$ um bis zu 184 % überschritten. Maximale Überschreitungen treten wiederum in den Gebieten hoher SO_2-Immissionen auf (Karte 44). Doch auch in der Nähe der Nordseeküste können Überschreitungen der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(1,5)$ um bis zu 100 % festgestellt werden. Unterschreitungen konzentrieren sich im Süden Bayerns und Baden-Württembergs. Sie nehmen allerdings nur 8 % der Gesamtfläche der BRD ein (Tabelle 11).

Die mit dem Faktor n = 2 berechnete akzeptable Korrosionsrate $K_{acc}(2)$ wird in Sachsen und Sachsen-Anhalt immer noch um bis 113 % überschritten (Karte 45). In der Nordhälfte Deutschlands liegen die aktuellen Korrosionsraten großflächig über der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(2)$. Nur in Bayern und Baden-Württemberg, sowie in Teilbereichen der Länder Rheinland-Pfalz und Mecklenburg-Vorpommern wird die akzeptable Korrosionsrate $K_{acc}(2)$ flächendeckend unterschritten. Diese Gebiete nehmen 31,7 % der Gesamtfläche der BRD ein (Tabelle 11).

Erst die Kartierung anhand der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(3)$ führt zu großflächigen Unterschreitungen der akzeptablen Korrosionsrate (Karte 46). Doch im Ruhrgebiet liegen die aktuellen Korrosionsraten immer noch um bis zu 25 %, im Grenzgebiet der Länder Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt sogar um bis zu 42 % über der als akzeptabel definierten Marke $K_{acc}(3)$. Auf 77 % der Fläche der BRD liegen die aktuellen Korrosionsraten unter der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(3)$ (Tabelle 11).

Tabelle 11: Bronze - Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korrosionsraten

Bronze Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korosionsraten			
Überschreitung in %	$K_{acc}(1,5)$	$K_{acc}(2)$	$K_{acc}(3)$
keine	8	31,7	87,5
0 -< 25	18	45,2	9,5
25 -< 50	37,2	11,1	3
50 -< 100	24,8	10,9	-
> 100	12	1,1	-

6.6 Portland Kalkstein – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten

Die extremsten Überschreitungen akzeptabler Korrosionsraten können für Portland Kalkstein festgestellt werden. In den Gebieten maximaler SO_2-Belastung liegen die aktuellen Korrosionsraten um bis zu 207 % über der akzeptablen Korrosionsrate, wenn diese mit dem Faktor n = 1,5 berechnet wird (Karte 47). Auf 11 % der Fläche der BRD wird die akzeptable Korrosionsrate $K_{acc}(1,5)$ um mehr als 100 % übertroffen (Tabelle 12). Auffällig ist auch die große Spannweite der ermittelten Über- beziehungsweise Unterschreitungen akzeptabler Korrosionsraten. Trotz der starken Überschreitungen in Sachsen, Thüringen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg liegen die aktuellen Korrosionsraten in Bayern, Baden-Württemberg oder auch im nördlichen Schleswig-Holstein um bis zu 54 % unter der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(1,5)$.

Das starke Gefälle zwischen den Gebieten mit Über- gegenüber denen mit Unterschreitung der akzeptablen Korrosionsrate wird auch bei der Kartierung anhand der mit Faktor n = 2 ermittelten akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(2)$ deutlich. Während in Sachsen Überschreitungen der akzeptablen Korrosionsrate um bis zu 132 % auftreten, liegen die aktuellen Korrosionsraten in weiten Teilen Deutschlands bereits um bis zu 65 % unter der akzeptablen Korrosionsrate (Karte 48). Auf 61,1 % der Fläche der BRD wird die akzeptable Korrosionsrate $K_{acc}(2)$ unterschritten (Tabelle 12).

Die akzeptable Korrosionsrate $K_{acc}(3)$ wird in Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt immer noch deutlich überschritten. Die Maximalwerte mit bis zu 55 % werden in Sachsen nahe der Grenze zur Republik Tschechien erreicht (Karte 49).

Tabelle 12:Bronze - Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korrosionsraten

Portland Kalkstein Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korosionsraten			
Überschreitung in %	$K_{acc}(1,5)$	$K_{acc}(2)$	$K_{acc}(3)$
keine	17,3	61,1	88,2
0 -< 25	34,9	20,9	7,6
25 -< 50	26,1	6,5	4,1
50 -< 100	10,4	9,5	0,1
> 100	11,3	2	-

6.7 Mansfield Sandstein – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten

Auch bei der Kartierung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten für Mansfield Sandstein fällt das starke Gefälle zwischen Gebieten mit deutlichen Überschreitungen und Gebieten mit deutlichen Unterschreitungen der akzeptablen Korrosionsraten auf. Bereits bei der Kartierung anhand der mit dem Faktor n = 1,5 berechneten akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(1,5)$ bleiben die aktuellen Korrosionsraten in den größten Teilen Baden-Württembergs, Bayerns und Schleswig-Holsteins unter der akzeptablen Korrosionsrate (Karte 50). Auch in Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern und Rheinland-Pfalz treten bereits auf großer Fläche Unterschreitungen auf. In scharfem Kontrast dazu stehen die deutlichen Überschreitungen der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(1,5)$ in den größten Teilen Sachsens, Thüringens und Sachsen-Anhalts. Hier liegen die aktuellen Korrosionsraten um bis zu 170 % über der akzeptablen Korrosionsrate. Auch im Ruhrgebiet werden Überschreitungen zwischen 50 % und 100 % erreicht. Die Ursache für das starke Gefälle zwischen Gebieten mit Über- beziehungsweise Unterschreitung der akzeptablen Korrosionsrate für die Materialien Portland Kalkstein und Mansfield Sandstein liegt in der im Vergleich zu den anderen Materialien noch stärkeren Gewichtung des Schadstoffparameters SO_2. Die räumlichen Muster der Karte der mittleren SO_2-Immission der Jahre 1993-1995 (Karte 5), mit sehr niedrigen Werten in Süddeutschland und sehr hohen Werten im Süden und Osten der neuen Bundesländer, treten stark hervor.

Bei der Kartierung anhand der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(2)$ verbleiben auf kleiner Fläche geringfügige Überschreitungen im Saarland, Ruhrgebiet, Bremerhaven und Hamburg (Karte 51). Großflächige Überschreitungen um 50 % bis 103 % sind in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen zu konstatieren. Um dieses Gebiet legt sich ein Ring geringfügiger Überschreitung der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(2)$. Im Norden reicht dieses Gebiet mit Überschreitungen bis 25 % Berlin. Auf 78,4 % der Fläche der BRD liegen die aktuellen Korrosionsraten unter der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(2)$ (Tabelle 13).

Die Kartierung anhand der mit Faktor n = 3 berechneten akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(3)$ läßt nur noch in Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt Überschreitungen erkennen (Karte 52). Im Maximum erreichen sie 35 %. Auf mehr als 90 % der Fläche der BRD wird die akzeptable Korrosionsrate $K_{acc}(3)$ unterschritten (Tabelle 13)

Tabelle 13: Mansfield Sandstein - Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korrosionsraten

Mansfield Sandstein Prozentualer Anteil einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche der BRD bei Anwendung unterschiedlicher akzeptabler Korosionsraten			
Überschreitung in %	$K_{acc}(1,5)$	$K_{acc}(2)$	$K_{acc}(3)$
keine	32,7	78,4	91,3
0 -< 25	44	8,2	7,1
25 -< 50	6,3	4,7	1,6
50 -< 100	8,3	8,7	-
> 100	8,7	0,1	-

6.8 Abschließende Bemerkungen zur Kartierung der Überschreitung der akzeptablen Korrosionsraten $K_{acc}(1,5)$, $K_{acc}(2)$ und $K_{acc}(3)$

Bei der Kartierung der Überschreitung der akzeptablen Korrosionsraten $K_{acc}(1,5)$, $K_{acc}(2)$ und $K_{acc}(3)$ werden unterschiedlich strenge Maßstäbe angelegt. Während bei der Kartierung anhand der mit dem Faktor n = 1,5 berechneten akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(1,5)$ in großen Teilen Deutschlands deutliche Überschreitungen auftreten, verbleiben bei der Kartierung anhand der mit dem Faktor n = 3 berechneten akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(3)$ nur noch relativ kleine Gebiete, in denen die aktuellen Korrosionsraten die akzeptable Korrosionsrate überschreiten. Dies sind in der Regel die Gebiete, für die auch die höchsten SO_2-Immissionen konstatiert werden können. Die mit der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}(2)$ erzielten Kartierungsergebnisse vermitteln zwischen diesen beiden Extremen.

Auch zwischen den einzelnen Materialien werden markante Unterschiede deutlich. Während für Portland Kalkstein und Mansfield Sandstein sowohl räumlich, als auch hinsichtlich der Höhe der Werte, auf engem Raum ein starkes Gefälle zwischen Gebieten mit Über- bezw. Unterschreitung akzeptabler Korrosionsraten festgestellt werden kann, führt die Kartierung für Verwitterungsbeständigen Stahl zu räumlich recht ausgeglichenen Ergebnissen.

Die dominante Wirkung der SO_2-Immission für die Korrosion der untersuchten Materialien wird aus der Zusammenschau der Karten zur SO_2-Immission, zu den aktuellen Korrosionsraten und der Karten zu den Überschreitungen akzeptabler Korrosionsraten gut erkennbar.

Die Entscheidung darüber, ob bei der Festlegung akzeptabler Korrosionsraten strenge oder weniger strenge Maßstäbe angelegt werden, wird sich an ökonomischen Gesichtspunkten orientieren müssen. Der Einfluß des Gewichtungsfaktors „n“ ($K_{acc} = n \cdot K_{10}$) auf die Kartierungsergebnisse ist dabei erheblich. Bei der Festlegung der Toleranzgrenzwerte für die Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien können die Kartierungsergebnisse zu den aktuellen und akzeptablen Korrosionsraten, in Verbindung mit den Resultaten der in Kapitel 7 vorgestellten ökonomischen Abschätzung von Korrosionsschäden, eine wichtige Entscheidungshilfe sein.

7 Ökonomische Abschätzung der Materialschäden in Deutschland

7.1 Einleitung

Ein weiteres Anwendungsgebiet der im Rahmen des ICP-Materials erarbeiteten Dosis-Wirkungsbeziehungen neben der Kartierung akzeptabler Toleranzgrenzwerte für Materialien ist die ökonomische Abschätzung von Materialschäden. Dementsprechend ist das Ziel dieses Teilprojekts die ökonomische Abschätzung von Materialschäden in Deutschland mittels dieser Dosis-Wirkungsbeziehungen. Eine solche Abschätzung setzt weitere Daten voraus, u.a. die aufwendige Erstellung eines Inventars der betroffenen Sachgüter. Daher wird hier die Abschätzung auf die Wohngebäude in Deutschland beschränkt.

Im folgenden Abschnitt wird die Methodik zur ökonomischen Abschätzung von Materialschäden dargelegt. Daran anschließend wird die Erstellung des Gebäude- und Materialkatasters erläutert und die ökonomische Abschätzung durchgeführt.

7.2 Methodik

7.2.1 Schadenskomponenten bei Sachgütern

Bei Sachgütern muß zwischen Gütern ohne besonderen kulturellen Wert (Gebrauchsgütern) und solchen mit besonderen kulturellen Wert (Kulturgütern) unterschieden werden.

Wenn Gebrauchsgüter durch Luftverunreinigungen geschädigt werden, entstehen durch verschiedene Aspekte Kosten für die Nutzer und Nutzerinnen dieser Sachgüter (Stankunas *et al.*, 1983), (Lareau *et al.*, 1986), (Frey *et al.*, 1991):

- *Beseitigungskosten*:
  - Durch die Luftverunreinigungen müssen die Gebrauchsgüter früher wieder instandgesetzt werden, als dies ohne die Luftbelastung notwendig wäre. Durch das kürzere Instandsetzungsintervall ergeben sich für den gleichen Nutzen höhere Kosten für die Eigentümer und Eigentümerinnen.
  - Die Instandsetzungskosten können in die direkten Kosten für die Instandsetzung (z.B. Material- und Arbeitskosten) und in indirekte Kosten (z.B. Kosten durch Verkehrsumleitungen) unterteilt werden. Im allgemeinen werden nur die direkten Kosten quantifiziert, da die indirekten Kosten zu fallspezifisch sind.
  - Einige Autoren unterstellen außerdem noch einen Zinsverlust in den darauffolgenden Jahren durch die höheren Ausgaben für die Instandsetzung (Passaglia, 1986). In der Praxis wird der Zinsverlust jedoch nicht berücksichtigt (Isecke *et al.*, 1990).

- *Folgekosten:*
  Wenn funktionale Beeinträchtigungen durch Korrosionsschäden nicht rechtzeitig behoben werden, da sie z.B. nicht erkannt werden oder nicht genügend Mittel zur Verfügung stehen, können weitere – größere – Schäden die Folge sein. Auch diese Kosten werden bei ökonomischen Schadensabschätzungen im allgemeinen nicht berücksichtigt, da sie zu fallspezifisch sind oder weil eine gute fachliche Praxis unterstellt wird.

- *Präventivkosten:*
  - Durch die Luftbelastung kommt es auch zu strukturellen Veränderungen, da sich die Nutzer und Nutzerinnen auf die Situation einstellen und deshalb auf schadstoffresistentere Materialien, die im allgemeinen teurer sind, ausweichen oder andere Präventivmaßnahmen ergreifen.
  - Da manche Materialien wegen ihrer mangelnden Resistenz gar nicht mehr verwendet werden (können), ist die Wahlfreiheit der Individuen eingeschränkt.
  - Die Präventivkosten sind schwierig zu bestimmen, da z.B. bei der Entwicklung von neuen Materialien mehrere Eigenschaften verbessert werden. Der Verbraucher ist eventuell nur wegen der anderen verbesserten Eigenschaften bereit, einen höheren Preis für das verbesserte Material zu bezahlen. Andererseits ist der Präventivanteil, z.B. die Zusatzkosten für eine Spezialfarbe mit höherer Schutzwirkung, oft in den Instandsetzungs- und Reparaturkosten enthalten, so daß es nicht unbedingt erforderlich erscheint, diese Präventivkomponente zu isolieren (Pons *et al.*, 1995).

- *Ästhetische Kosten:*
  - Abgesehen von den direkten ökonomischen Kosten wird der ästhetische Wert während der Instandsetzungsperiode durch die Luftverunreinigungen vermindert.
  - Bei Annahme eines von individuellen Entscheidungen unabhängigen Instandsetzungskriteriums tritt außer den Instandsetzungskosten kein zusätzlicher ästhetischer Wertverlust auf, da zwar die Zustandsverschlechterung schneller eintritt, aber auch in gleichem Maße öfter instandgesetzt wird. Somit ist der durchschnittliche Zustand des Sachguts derselbe wie vorher.
  - Insbesondere für private Gebäude liegt es jedoch in der Hand der Eigentümer, bei welchem Zustand des Gebäudes eine Instandsetzung durchgeführt wird. In diesem Fall könnte mit zunehmender Luftschadstoffbelastung auch die (immaterielle) Komponente eines ästhetischen Schadens zunehmen. Aus der Annahme, daß die Hausbesitzer die Instandsetzungsperioden so wählen, daß die durchschnittlichen Gesamtkosten, bestehend aus den direkten Instandsetzungskosten und den immateriellen (ästhetischen) Kosten, minimal sind, folgt – im einfachsten Fall, wenn der ästhetische Verlust mit steigender Zustandsverschlechterung linear zunimmt –, daß im Optimum ästhetische Kosten und direkte Instandsetzungskosten gleich hoch sind. Präferenzen der Mieter oder der allgemeinen Öffentlichkeit werden in diesem Ansatz allerdings bestenfalls indirekt berücksichtigt (Pons *et al.*, 1995).

Wegen der genannten Schwierigkeiten, beschränken sich Abschätzungen der Materialschäden an Gebrauchsgütern im allgemeinen auf die direkten Instandsetzungskosten.

Bei Kulturgütern kommt zu den genannten Schadenskomponenten noch die Beeinträchtigung des kulturellen Wertes hinzu. „Kultureller Wert“ ist nicht eindeutig zu definieren. Originalität und Authentizität sind sicher wichtige Aspekte davon, zumindest aus Sicht der Denkmalpflege. Wichtig ist, daß durch Schädigung *und* Restauration eines Kulturguts dessen Originalität und Authentizität beeinträchtigt werden, d.h. der kulturelle Wert irreversibel gemindert wird (Isecke *et al.*, 1990), (Kuik *et al.*, 1991). Es gibt zwar Hinweise darauf, daß Nichtfachleute der Originalität weniger Wert beimessen und Reproduktionen für ausreichend halten (s. z.B. eine Studie von Navrud *et al.* (1992)), aber aufgrund der Heterogenität des Bestandes an Kulturgütern können solche Ergebnisse kaum pauschalisiert werden. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um zu ermitteln, welche Bedeutung der Originalitätsverlust für eine repräsentative Öffentlichkeit hat bzw. worin für die Allgemeinheit der kulturelle Wert überhaupt besteht.

7.2.2 Verfahren zur Berechnung der Instandsetzungskosten

Es gibt zwei prinzipielle Vorgehensweisen zur Abschätzung der Instandsetzungskosten durch Luftverunreinigungen an Sachgütern (UN-ECE, 1984), (Iseckeet al., 1990), (Sherwood *et al.*, 1991):

- Die *Regionaldifferenzierungsmethode*:
  Die Unterschiede bei den (spezifischen) Schadenskosten zwischen zwei oder mehr Regionen werden bestimmt. Diese Kostenunterschiede werden den Unterschieden bei der Luftbelastung zugeordnet. Eine Voraussetzung für diese Methode ist, daß sich die Regionen - abgesehen von der Luftbelastung - nicht oder nur wenig unterscheiden, oder daß Unterschiede, die zu veränderten Schadenskosten führen, z.B. Verhaltensunterschiede, im Ansatz berücksichtigt werden. Die Methode ist mit verschiedenen Zuordnungsproblemen verbunden. Z.B. setzt diese Methode voraus, daß bereits bekannt ist, welche Luftverunreinigungen überhaupt relevant sind. Im übrigen ist eine Anwendung der Methode auf ein größeres Gebiet wegen des damit verbundenen Aufwands schwer möglich. Eine Fortschreibung ist praktisch ausgeschlossen.

- Der *Schadensfunktionsansatz*:
  Die Materialschädigungen werden mit Hilfe von Schadensfunktionen aus den gegebenen Luftbelastungen berechnet. Dabei stellt die sogenannte Dosis-Wirkungsbeziehung, d.h. eine quantitative Beziehung zwischen Luftbelastung, Klimaeinflüssen, etc. und z.B. Korrosion, allein noch keine Schadensfunktion dar. Erst durch die Kombination der Dosis-Wirkungsbeziehung mit einem Instandsetzungskriterium ergibt sich eine *physische Schadensfunktion*. Die physische Schadensfunktion zusammen mit Daten zum Materialbestand und zu den flächenspezifischen Instandsetzungskosten ist die *ökonomische Schadensfunktion* (Kucera *et al.*, 1997). Ein solcher Ansatz ist fortschreibbar und auch auf ein größeres Untersuchungsgebiet anwendbar.

Beim Regionaldifferenzierungsansatz erfolgt die Berechnung der Instandsetzungskosten nach folgender Formel (Iseckeet al., 1990):

$$\Delta k = k_{spez} \cdot O_{R1} \cdot \left(\frac{1}{I_{R1}} - \frac{1}{I_{R2}} \right) \qquad (1)$$

mit

Δk	Unterschiede bei den jährlichen Instandsetzungskosten zwischen Region 1 (R1) und Region 2 (R2)
k_{spez}	Spezifische Instandsetzungskosten
O_{R1}	Materialoberfläche in Region 1
I_{R1}	Instandsetzungsintervall in Region 1
I_{R2}	Instandsetzungsintervall in Region 2

Beim Schadensfunktionsansatz ergeben sich die zusätzlichen, jährlichen Kosten Δk jedoch aus dem berechneten Unterschied zwischen den „Zuständen“ der betrachteten Sachgüter für zwei unterschiedliche Umweltbelastungen:

$$\Delta k = k_{spez} \cdot O \cdot \frac{\Delta Z}{Z_{krit}} \qquad (2)$$

mit

O	Materialoberfläche im Untersuchungsgebiet
ΔZ	jährliche Zustand(sbeeinträchtigung)
Z_{krit}	kritische Zustandsänderung (Instandsetzungskriterium)

Zustandsbeeinträchtigungen der Sachgüter umfassen verschiedene Arten der Schädigung, z.B. der Materialabtrag durch Korrosion oder die Verschmutzung durch Ablagerung von (kohlenstoffhaltigen) Staub. Der Materialabtrag durch Korrosion wird oft durch den Dickenverlust dargestellt (Peters, 1986).

Mit $Z_{krit} = I \cdot \Delta Z$ gehen die beiden angeführten Gleichungen ineinander über. Gleichung (2) gilt im strengen Sinne jedoch nur, wenn

- bei den Materialoberflächen des Untersuchungsgebiets die bereits erfolgte Zustandsverschlechterung gleichmäßig zwischen 0 und der kritischen Zustandsverschlechterung verteilt ist (Peters, 1986). Dies kann in erster Näherung angenommen werden, es gibt jedoch einige Fälle, bei denen dies weniger zutrifft. Zum Beispiel wenn ein Material erst vor kurzem auf dem Markt eingeführt wurde oder wenn es zeitweilig einen Bauboom gab.
- die jährliche Zustandsbeeinträchtigung konstant ist. Sowohl bei wechselnden Schadstoffbelastungen als auch bei nicht-linearen Zusammenhängen zwischen Luftbelastung und Schaden ist dies nicht der Fall.
- von der Diskontierung abgesehen wird.

Tatsächlich entstehen die zusätzlichen Kosten durch die Luftbelastung eines Bezugsjahres nicht ausschließlich im Bezugsjahr, sondern verteilen sich über die folgende Instandsetzungsperiode. Da der vorerst noch verfügbare Betrag angelegt werden kann, damit also Zinserträge erwirtschaftet werden können, sollten zukünftige Kosten abgezinst (diskontiert) werden. Gleichung (2) sieht unter Berücksichtigung der Diskontrate wie folgt aus:

$$\Delta k = k_{spez} \cdot O \cdot \frac{\Delta Z}{Z_{krit}} \cdot \frac{1}{I} \cdot \sum_{t=0}^{I-1} \left(\frac{1}{1+r} \right)^t = k_{spez} \cdot O \cdot \frac{\Delta Z}{Z_{krit}} \cdot F \qquad (3)$$

mit

r	Diskontrate
I	Lebensdauer

Dabei wird der langfristige, inflationsbereinigte Kapitalmarktzins zugrundegelegt, der ca. bei 3% liegt. Ein Vergleich mit Gleichung (2) zeigt, daß die jährlichen Schadenskosten durch die Luftverschmutzung eines Jahres bei Berücksichtigung einer Diskontrate um den Faktor F kleiner sind als ohne. Abb.2: zeigt, welche Werte der Faktor F in Abhängigkeit von Zinssatz r und Lebensdauer I annimmt. Bei größeren Lebensdauern (> 20 Jahre) werden die Schadenskosten durch den Faktor F also teilweise um die Hälfte oder mehr reduziert.

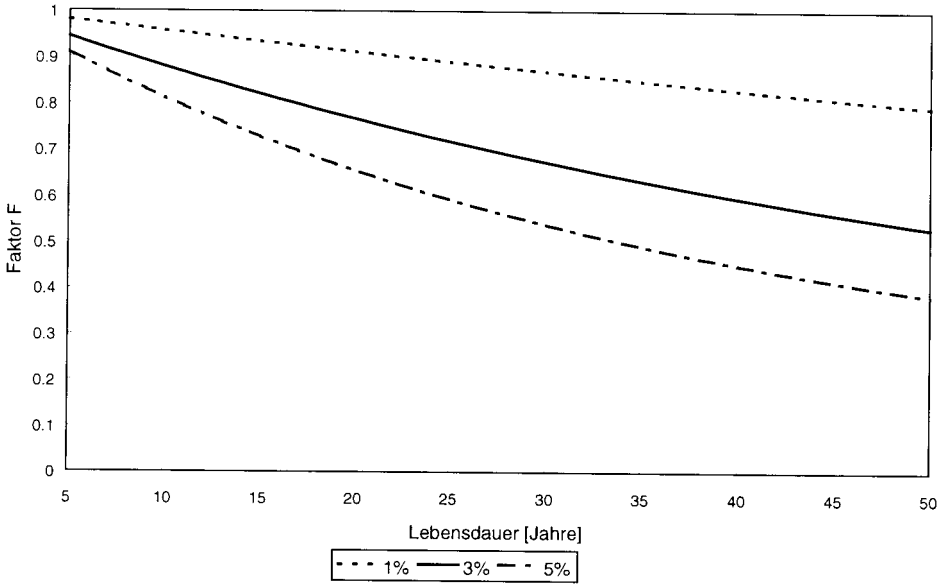

Abb. 2: Faktor F aus Gleichung (3) für verschiedene Zinssätze in Abhängigkeit von der Lebensdauer

Da der Schadensfunktionsansatz fortschreibbar ist und auf ein größeres Untersuchungsgebiet angewandt werden kann, sollen mit ihm in dieser Studie aufbauend auf den Ergebnissen der Kartierung der aktuellen Korrosionsraten für Materialien (s. Kapitel 5) die Schäden an Gebrauchsgütern in Deutschland abgeschätzt werden.

Abb. zeigt das Flußbild für die Quantifizierung der Instandsetzungskosten an Gebrauchsgütern mittels des Schadensfunktionsansatzes (Mayerhofer*et al.*, 1995), (Mayerhofer *et al.*, 1997). Die Berechnung der Schädigungen erfolgt über die in den Abschnitten 5.1 und 5.2 beschriebenen Dosis-Wirkungsbeziehungen. Entsprechend Gl(2) ergibt die jährliche Schädigung geteilt durch die kritische Schädigung den Anteil der Materialoberfläche, der im Bezugsjahr aufgrund der Luftverschmutzung instandgesetzt werden muß. Zusammen mit den Materialoberflächen und den flächenspezifischen Instandsetzungskosten können dann die zusätzlichen jährlichen Instandsetzungskosten berechnet werden.

7.2.3 Kulturgüter

Die Erfassung der Schäden an Sachgütern mit besonderen kulturellen Wert (Kulturgütern) gestaltet sich schwierig. In der Vergangenheit wurden nur wenige Versuche gemacht, Schäden an Kulturgütern flächendeckend ökonomisch oder anders abzudecken, oft beschränkt auf einzelne Aspekte (z.B. (Triebswetter, 1998), (Navrud *et al.*, 1992), (Grosclaude, Soguel, 1994), (Feenstra, 1984), (Cordaro *et al.*, 1997), (Muraro, 1974), (Schreiber, 1982)). Dabei werden die Probleme immer wieder thematisiert, ohne daß es zu Fortschritten auf diesem Gebiet kommt.

Schwierigkeiten bereitet unter anderem die Erfassung der Kulturgüter. In Deutschland wird inzwischen eine Denkmaltopographie aufgebaut, diese Arbeiten werden sich aber noch Jahre, wenn nicht gar Jahrzehnte hinziehen. Die Denkmaltopographie wird vermutlich auch nach Fertigstellung kaum Hilfestelung bei der Erfassung der Schäden geben, da sie in erster Linie ihr Punkte erfaßt, die für die kunsthistorische Bedeutungsanalyse von Belang sind

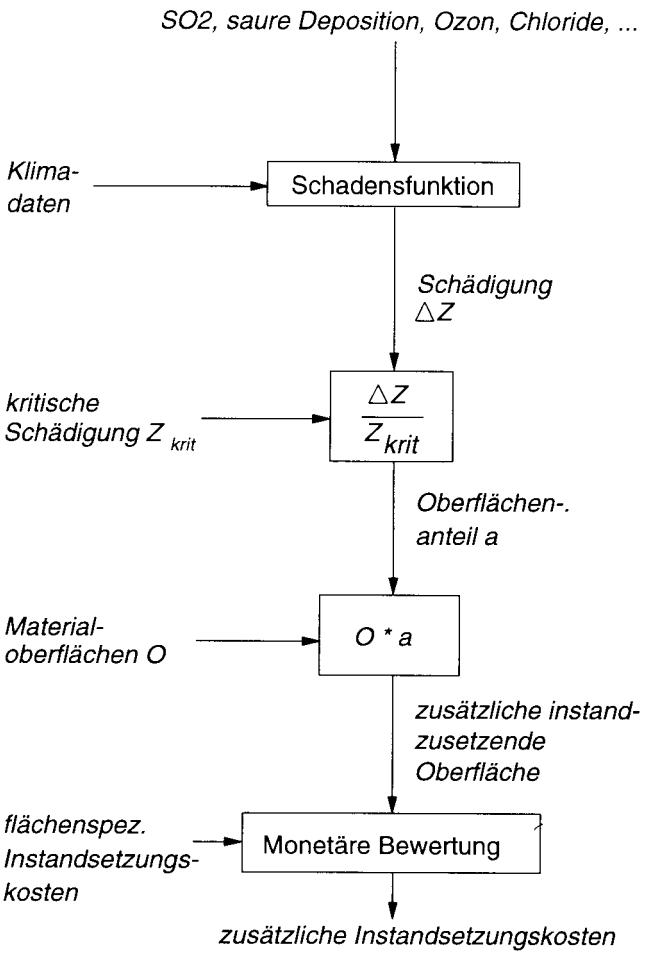

Abb. 3: Flußbild für das Verfahren zur Quantifizierung von Instandsetzungskosten an Gebrauchsgütern

(Lübbecke, 1989). Nicht erfaßt werden aber die genaue Größe des Objektes, die genauen Materialien, die Exponiertheit gegenüber Luftverunreinigungen, momentane Schäden und ihre voraussichtlichen Ursachen, usw. Gerade Kulturgüter stellen einen sehr heterogenen Sachgutbestand dar. Sie reichen von einzelnen Statuen über Burgen bis zu städtischen Gründerzeithäusern. Als Materialien wurden Natursteine unterschiedlichster Herkunft, Bronze, Kupfer, Holz, aber auch Beton und Stahl verwendet.

Hinzu kommt, daß nicht alle Sachgüter, denen die verschiedenen Individuen kulturellen Wert zuschreiben, Denkmäler sind. Umgekehrt wird nicht jedes von der Denkmalpflege als Denkmal klassifiziertes Sachgut von der Öffentlichkeit als schützenswert empfunden. Gerade in der Denkmalpflege selbst wird immer wieder problematisiert, daß die Öffentlichkeit ihre Auffassung vom Denkmalbegriff nicht teilt (Backes, 1987), (Grunsky, 1991), (Wulf, 1989).

Die „objekt- oder flächenspezifischen Instandsetzungskosten“ können nicht pauschal benannt werden. Im allgemeinen ist eine sorgfältige Restauration notwendig, deren Kosten sich von Objekt zu Objekt stark unterscheiden, da unterschiedliche Materialien für unterschiedlichste Gestaltungsformen verwendet wurden und Objekte von unterschiedlichsten Faktoren

im Laufe ihrer Geschichte geschädigt worden sind. Die Problematik, daß der kulturelle Wert des Sachguts durch eine Restauration nicht unbedingt wiederhergestellt werden kann, wurde bereits in Abschnitt 7.2.1 angeführt.

Auch die Gesamtsumme der Restaurationskosten eignet sich nur bedingt zur Erfassung der Schäden. Zum einen ist sie schwer zu ermitteln, da schon die öffentlichen Ausgaben nicht zentral erfaßt werden und die privaten Ausgaben praktisch nie vollständig ermittelt werden können (s. z.B. die Erhebung von (Triebswetter, 1998)). Zum anderen können sie auch nur schwer den Luftverunreinigungen zugeordnet werden. Die zu behebenden Schäden können von ganz anderen Faktoren (natürliche Verwitterung, nicht fachgerechte Behandlung, Kriegszerstörungen, etc.) verursacht worden sein. Auch der Zeitraum, der notwendig war, um ein Objekt soweit zu schädigen, daß eine Restauration notwendig wurde, ist nicht bekannt. Und - noch bedeutsamer - die Ausgaben für Restaurierungen hängen weniger vom Bedarf ab, der sich aus den Bedürfnissen und Bewertungen der Bürger und Bürgerinnen ableitet, sondern werden vielmehr von politischen und finanziellen Gesichtspunkte, von den Präferenzen staatlicher Organe also, bestimmt (Isecke *et al.*, 1990), (Kuik, Jansen, 1992). Dies bedeutet allerdings nicht, daß hier die großen Schädigungen von Kulturgütern durch Luftverunreinigungen in Abrede gestellt werden sollen. Gerade wenn Fotos von Kulturgütern zu Anfang des Jahrhunderts mit dem heutigen Zustand dieser Kulturgüter verglichen werden, werden die Auswirkungen der hohen Luftbelastung deutlich (Feenstra, 1984), (DND, 1986).

Aus den genannten Punkten kann geschlossen werden, daß der Schadensfunktionsansatz bei Kulturgütern zur Zeit nicht anwendbar ist, da der Bestand nicht erfaßt ist und die flächenspezifischen Instandsetzungskosten nicht benannt werden können. Bei den Schadensfunktionen stellt sich auch die Frage, ob sie die eintretenden Schäden adäquat abbilden. Die Regionaldifferenzierung ist in erster Linie deshalb nicht anwendbar, weil die Kulturgüter in verschiedenen Regionen kaum vergleichbar sind. Dazu kommt noch, daß die Restaurationskosten kaum zusammengestellt werden können, und, wenn doch erfaßt, doch nicht den Luftverunreinigungen zugeordnet werden können, da die tatsächlichen Ausgaben im wesentlichen von anderen Faktoren bestimmt werden. Für beide Verfahren gilt, daß der kulturelle Wertverlust nicht quantitativ erfaßt werden kann (s. Abschnitt 7.2.1). Diese Studie beschränkt sich daher auf die Abschätzung der Schäden bei Gebrauchsgütern.

7.2.4 Frühere Studien

Es wurde bereits eine Vielzahl ökonomischer Schadensabschätzungen für Gebrauchsgüter durchgeführt, die auch bereits verschiedentlich zusammengestellt und bewertet wurden (Yocom, Upham, 1977), (Stankunas *et al.*, 1983), (UN-ECE, 1984), (Yocom *et al.*, 1986), (Isekke *et al.*, 1990), (Kuik, Jansen, 1992). Die neuesten Abschätzungen wurden bei einem UN-ECE Workshop in Stockholm im Januar 1996 vorgestellt (Kucera *et al.*, 1997). Es wurden ökonomische Abschätzungen für Großbritannien (Yates *et al.*, 1997), Norwegen (Glomsrød *et al.*, 1997) und Europa insgesamt (ApSimon, Cowell, 1997), (Mayerhofer *et al.*, 1997) präsentiert.

Für Deutschland sind insbesondere zwei Studien hervorzuheben. Die erste wurde 1979 von Ingo Heinz am Institut für Umweltschutz der Universität Dortmund durchgeführt (Heinz, 1983). Heinz quantifizierte mittels des Regionaldifferenzierungsansatzes zusätzliche Korrosionskosten an Brücken, Eisenbahnfahrleitungsanlagen und Hochspannungsanlagen sowie die Reinigungskosten für Textilien im früheren Bundesgebiet. In einer zweiten Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes erweiterten Isecke, Weltschev und Heinz 1990 die berück-

sichtigten Gebrauchsgüter und ermittelten zusätzlich die Korrosionsschäden an Freileitungsmasten und -isolatoren, an fernmeldetechnischen Einrichtungen, an einigen Industrieanlagen sowie an Wohngebäuden in West-Deutschland (Isecke *et al.*, 1990).

7.3 Herleitung der Kataster für Gebäude und Materialoberflächen

Im folgenden wird der Begriff „Kataster" den Begriffen „Inventar" oder „Bestand" vorgezogen. Analog zum Emissionskataster sollen mit der Verwendung des Begriffs „Kataster" zwei Aspekte betont werden:

- Der Bestand an Gebäuden, Materialoberflächen, etc. wird berechnet, nicht zählerisch erfaßt (der Begriff „Inventar" würde auf letzteres verweisen).
- Der Standort der Gebäude, etc. wird miterfaßt, d.h. der Bestand der Gebäude wird je administrative Einheit bzw. je Siedlungsfläche ausgewiesen.

Die Herleitung des Katasters erfolgt in drei Schritten:

1. Das Gebäudekataster wird für einen bestimmten Zeitpunkt und in einer bestimmten räumlichen Auflösung zusammengestellt, hier auf Kreisebene für den 31. Dezember 1995. Die Ergebnisse liegen als Excel-Spreadsheets vor.
2. Aus dem Gebäudekataster und weiteren Daten wird das Materialkataster für Wohngebäude auf Kreisebene zum 31. Dezember 1995 bestimmt. Dafür wird die Programmiersprache PERL verwendet.
3. Die Gebäude bzw. Materialoberflächen jedes Kreises werden in ArcInfo-Coverages und -Grids überführt.

7.3.1 Die Herleitung des Gebäudekatasters

Die letzte Gebäudezählung in den alten Bundesländern erfolgte im Jahr 1987 (*GWZ87*), in den neuen Bundesländern 1995 (*GWZ95*). Zwischen den Gebäudezählungen wird der Gebäude- und Wohnungsbestand von den Statistischen Landesämtern bzw. dem Statistischen Bundesamt durch den Saldo der Zu- und Abgänge an Wohngebäuden und Wohnungen aus Ergebnissen der Bautätigkeitsstatistik fortgeschrieben (*FGWB*). Die aktuellsten Zahlen wurden für den 31. Dezember 1995 veröffentlicht (StaBA, 1997).

Tabelle 14: Gliederung der Gebäude in der GWZ87 (Auszug) (Für mit „Kreis“ bzw. „Land“ gekennzeichnete Zellen stehen Daten auf Kreis- bzw. Landesebene zur Verfügung; für Zellen ohne Eintrag gibt es keine Daten. Fettgedruckt sind die Daten, die in dieser Studie verwendet werden.)

Wohngebäude[1]	**Insgesamt**	**Darin Wohnungen**	**Mit 1 Wohnung**	**Mit 2 Wohnungen**	**Mit 3-6 Wohnungen**	**Mit [3]7 Wohnungen**	**Mit 7-12 Wohnungen**	**Mit [3]13 Wohnungen**
Insgesamt	**Kreis**	**Kreis**	**Kreis**	**Kreis**	**Kreis**	**Kreis**	**Land**	**Land**
Baujahr								
• bis 1900		**Kreis**	Land	Land	Land		Land	Land
• 1901-1918		**Kreis**	Land	Land	Land		Land	Land
• bis 1918	**Kreis**							
• 1919–1948	**Kreis**	Kreis	Land	Land	Land		Land	Land
• 1949–1957	**Kreis**	Kreis	Land	Land	Land		Land	Land
• 1958-1962	Land	Land	Land	Land	Land		Land	Land
• 1963-1968	Land	Land	Land	Land	Land		Land	Land
• 1958–1968	**Kreis**	Kreis						
• 1969-1973	Land	Land	Land	Land	Land		Land	Land
• 1974-1978	Land	Land	Land	Land	Land		Land	Land
• 1969–1978	**Kreis**	Kreis						
• 1979-1983	Land	Land	Land	Land	Land		Land	Land
• 1984 und später	Land	Land	Land	Land	Land		Land	Land
• 1979 und später	**Kreis**	Kreis						

[1] Ohne Wohnheime, ohne Wohngebäude nur mit 1 oder 2 Ferien-/Freizeitwohneinheiten.

[2] Ohne Freizeitwohnungen und ohne Wohnungen in Gebäuden mit vollständiger Wohnheimnutzung.

Tabelle 15: Gliederung der Gebäude in der GWZ95 (Auszug) (Für mit „x“ gekennzeichnete Zellen stehen Daten zur Verfügung. Fettgedruckt sind die Daten, die in dieser Studie verwendet werden.)

Gebäude	**Gebäude mit Wohnraum**			**Darunter**		
	insgesamt	**darin Wohneinheiten**	**darunter Wohnungen**	**Wohngebäude[1] insgesamt**	**darin Wohneinheiten[2]**	**darunter Wohnungen[2]**
Insgesamt	x	x	x	**x**	x	**x**
Baujahr (von ... bis ... errichtet)						
• bis 1900	x	x	x	**x**	x	**x**
• 1901–1918	x	x	x	**x**	x	**x**
• 1919–1948	x	x	x	**x**	x	**x**
• 1949–1968	x	x	x	**x**	x	**x**
• 1969–1981	x	x	x	**x**	x	**x**
• 1982–1987	x	x	x	**x**	x	**x**
• 1988–1990	x	x	x	**x**	x	**x**
• 1991–1993	x	x	x	**x**	x	**x**
• 1994 und später	x	x	x	**x**	x	**x**
Zahl der Wohnungen						
• 1 Wohnung	x	x	x	**x**	x	x
• 2 Wohnungen	x	x	x	x	x	x
• 3 und mehr Wohnungen	x	x	x	x	x	x
Zahl der Geschosse						
• 1 Geschoß	x	x	x	**x**	x	x
• 2 Geschosse	x	x	x	**x**	x	x
• 3 bis 7 Geschosse	x	x	x	**x**	x	x
• 8 und mehr Geschosse	x	x	x	**x**	x	x
Bauweise des Gebäudes						
• Traditionelle Bauweise	x	x	x	**x**	x	x
• Montagebauweise	x	x	x	**x**	x	x

[1] Ohne Wohnheime, ohne Wohngebäude nur mit 1 oder 2 Ferien-/Freizeitwohneinheiten.

[2] Ohne Ferien-/Freizeitwohneinheiten.

Tabelle 14 und Tabelle 15 zeigen die Untergliederungen der beiden Gebäudezählungen, soweit sie für diese Studie relevant sind. Die GWZ95 ist weiter untergliedert als die GWZ87. In der GWZ87 sind die Wohngebäude nach Anzahl der Wohnungen sowie nach Baualter des Gebäudes erfaßt. In der GWZ95 sind die Wohngebäude u.a. auch nach Anzahl der Geschosse und nach der Bauweise untergliedert. Um den Datenschutz zu gewährleisten, werden manche Datenuntergliederungen nur auf größeren administrativen Einheiten zur Verfügung gestellt. Die Baualtersklassen der beiden Gebäudezählungen stimmen nicht völlig überein. Die Fortschreibung des Gebäudebestands ist nur in Hinblick auf die Anzahl der Wohnungen in einem Gebäude untergliedert (Tabelle 16).

Tabelle 16: Gliederung der Gebäude in der FGWB95 (Auszug) (Für mit „Kreis“ bzw. „Land“ gekennzeichnete Zellen stehen Daten auf Kreis- bzw. Landesebene zur Verfügung; für Zellen ohne Eintrag gibt es keine Daten. Fettgedruckt sind die Daten, die in dieser Studie verwendet werden.)

Gebäude	**Insgesamt**	**nach Zahl der Wohnungen**		
		1	**2**	**3 und mehr**
Wohn- und Nichtwohngebäude				
• Insgesamt				
• darin Wohnungen	Kreis	Land	Land	Land
• Zugang an Wohnungen im letzten Jahr	[2]	[2]	[2]	[2]
• Totalabgang an Wohnungen im letzten Jahr	[2]	[2]	[2]	[2]
Darunter Wohngebäude[1]				
• Insgesamt	**Kreis**	**Kreis**	**Kreis**	**Kreis**
• Zugang an Gebäuden im letzten Jahr	**[2]**	**[2]**	**[2]**	**[2]**
• Totalabgang an Gebäuden im letzten Jahr	**[2]**	**[2]**	**[2]**	**[2]**
• darin Wohnungen	Kreis	Kreis	Kreis	Kreis
• Zugang an Wohnungen im letzten Jahr	[2]	[2]	[2]	[2]
• Totalabgang an Wohnungen im letzten Jahr	[2]	[2]	[2]	[2]

[1] Ohne Wohnheime

[2] Auf Regierungsbezirksebene für Baden-Württemberg, Bayern, Berlin, Hessen, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Sachsen-Anhalt; als Summe für alle kreisfreien Städte bzw. alle Landkreise für Brandenburg, Sachsen, Schleswig-Holstein, Thüringen; auf Landesebene für Bremen, Hamburg, Saarland

Die Gliederung des hergeleiteten Gebäudekatasters unterscheidet zwischen den alten und den neuen Bundesländern (s.Tabelle 17). Die folgenden Annahmen lagen der Herleitung für die alten Bundesländer zugrunde:

- Die Wohngebäude der GWZ87 auf Kreisebene in der Baualtersklasse „bis 1918“ werden entsprechend des Verhältnisses der Wohnungen in den Baualtersklassen „bis 1900“ und „1901-1918“ auf diese beiden Altersklassen verteilt. Wahlweise könnte das Verhältnis der beiden Baualtersklassen auf Landesebene herangezogen werden.

- Die Wohngebäude der GWZ87 auf Kreisebene in der Baualtersklasse „1979 und später“ werden entsprechend des Verhältnisses der beiden Baualtersklassen „1979-1984“ und „1984 und später“ auf Landesebene aufgeteilt. Die anderen Baualtersklassen auf Kreisebene werden beibehalten. Es ergeben sich insgesamt 8 Baualtersklassen.

- Die Wohngebäude der GWZ 87 auf Kreisebene in den Baualtersklassen werden entsprechend der Verhältnisse der Wohngebäude in den 5 Klassen zur Zahl der Wohnungen auf Landesebene aufgeteilt. Es ergeben sich 40 Gebäudeklassen (8 Altersklassen x 5 Wohnungszahl-Klassen).

- Die Totalabgänge der Wohngebäude in den 3 Wohnungszahl-Klassen der FGWBs zwischen 1988 und 1995 werden von diesen 40 Klassen abgezogen, dabei wird angenommen, daß die Totalabgänge gleichmäßig auf die 7 älteren Baualtersklassen verteilt sind. Das Verhältnis der drei oberen Wohnungszahl-Klassen der GWZ87 („Wohngebäude mit 3-6“, „mit 7-12 Wohnungen“ und „mit 13 und mehr Wohnungen“) wird beibehalten.

Tabelle 17: Anzahl der Wohngebäude in Deutschland 1995 (Zusammenfassung des Gebäudekatasters)

WEST	Anzahl der Wohnungen					Zusammen
Baujahr	1	2	3-6	7-12	13	
1900	929517	320237	152090	538579	76120	2016542
1918	504807	177165	117263	434423	57366	1291024
1948	976193	334084	215444	838836	65007	2429564
1957	965037	333250	211529	772328	112906	2395049
1968	1587924	537384	307593	1055070	220427	3708398
1978	1425106	474404	247874	706239	311140	3164762
1983	636218	209610	109407	342428	106393	1404056
1987	318712	105242	55156	175708	50784	705601
1995	720354	246933	52180	109105	18412	1146984
Zusammen	8063867	2738308	1468535	4972716	1018554	18261980

OST	Anzahl der Geschosse				Zusammen
Baujahr	1	2	3-7	7	
bis 1900	144048	410052	180972	4420	739492
1901-1918	51869	133671	73662	1978	261180
1919-1948	157574	377340	212274	6454	753642
1949-1968	69500	163354	85540	2647	321042
1969-1981	53241	136149	69619	2201	261210
1982-1987	29947	75435	40356	1620	147359
1988-1990	15019	36722	19501	763	72004
1991-1993	14456	35758	16021	499	66734
1994-1995	19061	45101	21931	605	86698
Zusammen	554716	1413583	719876	21186	2709361

- Die Zugänge der FGWBs zwischen 1988 und 1995 werden der Altersklasse „1987-1995“ zugeordnet. Die Aufteilung der Zugänge nach Wohnungszahl wird aus den FGWBs übernommen. Die Wohnungszahl-Klasse „3 und mehr Wohnungen“ wird entsprechend des Verhältnisses in der GWZ87 in die drei oberen Wohnungszahl-Klassen aufgeteilt.

Für die neuen Bundesländer gilt hingegen die folgenden Annahme:

- Die Wohngebäude der GWZ95 in den Baualtersklassen werden entsprechend der Verhältnisse der Wohngebäude in den 4 Klassen zur Zahl der Geschosse sowie entsprechend der 2 Bauweise-Klassen aufgeteilt. Es ergeben sich 72 Klassen (9 Altersklassen x 4 Geschosszahl-Klassen x 2 Bauweise-Klassen).

Tabelle 17 zeigt die Gesamtergebnisse, aufgeteilt nach West und Ost.

7.3.2 Ableitung eines Materialkatasters

Da die Materialoberflächen (bzw. andere Eigenschaften) von Sachgütern in einem größeren Gebiet nicht direkt erhoben werden können, müssen diese indirekt hergeleitet werden. Dafür gibt es in Prinzip zwei Möglichkeiten:

- Aus Verkaufszahlen wird der Einsatz bestimmter Materialien hergeleitet. Problematisch ist hierbei die Zuordnung der Materialien zu einem bestimmten Verwendungszweck, die

räumliche Zuordnung, Export-/Importströme sowie die Bestimmung der Abgänge aus dem Inventar. Die Methode wurde in einigen frühen Studien in den USA eingesetzt, wird aber wegen der genannten Unsicherheiten sehr kritisch beurteilt (Sherwood *et al.*, 1991). Es gibt nur sehr wenige sinnvolle Anwendungsfelder für diese Methode.

- Die Kombination von Materialoberflächen typischer Sachgüter mit räumlich aufgelösten, statistischen Daten. Diese Methode wurde in den letzten Jahren auf verschiedenen Forschungsfeldern (z.B. Ableitung eines Materialinventars, Bestimmung von Einsparpotentialen in Wohngebäuden) etabliert und wird auch in dieser Studie verwendet.

Im einfachsten Fall können repräsentative Gebäude entsprechend der Bevölkerungszahl auf ein bestimmtes Gebiet extrapoliert werden (*Bevölkerungsmethode*). Eine solche Vorgehensweise ist jedoch sehr grob, bessere Verfahren sind wünschenswert.

In Deutschland wurden im Rahmen von Studien zur Bestimmung der Energiesparpotentiale im Haushaltsbereich, für die z.B. der bestehende Wärmeschutz der Gebäude bekannt sein sollte, drei Verfahren zur Ableitung der räumlichen Verteilung repräsentativer Gebäude entwickelt:

- *Siedlungstypenmethode*: Roth *et al.* (1980) identifizierten neun Siedlungstypen, aus denen sich westdeutsche Siedlungen zusammensetzen. Jeder Siedlungstyp hat eine typische Erschließungsform in topographischen Karten (Auflösung 1:50 000 und 1:25 000). Außerdem wurden für jeden Siedlungstyp ein charakteristisches Gebäude sowie die Anzahl der Gebäude je Siedlungsfläche festgelegt. Roth *et al.* bestimmten anhand topographischer Karten die Siedlungflächen der einzelnen Siedlungstypen in einer repräsentativen Anzahl von Gemeinden im Abhängigkeit davon, zu welchem Raumtyp die Gemeinde gehörte (Kernstadt, Außenzone, Mittelstadt, ländliches Gebiet). Im nächsten Schritt berechneten sie Regressionsgleichungen zwischen den ermittelten Siedlungsflächen und den Merkmalen der Gemeindestatistik. Dabei wurden in den Regressionsgleichungen nur Merkmale berücksichtigt, für die sich hohe Bestimmtheitsmaße (R^2) ergaben. Interessanterweise gehörte die Bevölkerungszahl nicht dazu. Mit den Regressiongleichungen konnten die Siedlungsflächen (und damit die Gebäude) je Siedlungstyp und Raumtyp bundesweit ermittelt werden.

  Die Merkmale der Gemeindestatistik haben sich seit der von 1970, die von Roth *et al.* zugrundegelegt wurde, zu stark verändert, als daß die Regressionsgleichungen noch verwendet werden könnten. Außerdem ist die Zusammenstellung von bundesweiten Daten auf Gemeindeebene sehr aufwendig, da diese nicht zentral beim Statistischen Bundesamt erfaßt sind, sondern bei den einzelnen Statistischen Landesämtern angefordert werden müssen.

Tabelle 18: Gebäudetypenmatrix für die alten Bundesländer (Gülec *et al.*, 1994a)

Typ	**A[1] bis 1900 Fachwerk**	**B 1901-1918 Massiv**	**C 1919-1948**	**D 1949-1957**	**E 1958-1968**	**F 1969-1978**	**G 1979-1983**	**H 1984-1987**
freistehende Einfamilienhäuser EFHW	EFHWA	EFHWB	EFHWC	EFHWD	EFHWE	EFHWF	EFHWG	EFHWH
Reihen- und Doppelhäuser RDHW	/	RDHWB	RDHWC	RDHWD	RDHWE	RDHWF	RDHWG	RDHWH
kleine Mehrfamilienhäuser bis 4 Geschosse KMHW	KMHWA	KMHWB	KMHWC	KMHWD	KMHWE	KMHWF	KMHWG	KMHWH
große Mehrfamilienhäuser GMHW	/	GMHWB	GMHWC	GMHWD	GMHWE	GMHWF	/	/
Hochhäuser HOHW	/	/	/	/	HOHWE	HOHWF	/	/

[1] überwiegend denkmalgeschützte Gebäude

- *Tarifraummethode*: Vorwiegend in Marketingstudien von Energieversorgungsunternehmen wurden aufbereitete Daten der Unternehmen (Kundennummern, Verbräuche, Tarifraumzahl) verwendet, um den Wärmebedarf zu berechnen. Strukturelle Merkmale der Gebäude werden dabei nicht berücksichtigt. Die Methode ist mit großen Unsicherheiten verbunden (z.B. Diskrepanzen zwischen tatsächlicher Anzahl der Räume und Tarifraumzahl) und auch nicht auf den Anwendungsfall dieser Studie übertragbar (Ebel *et al.*, 1990).

- *Gebäudetypenmethode*: Es werden Gebäudetypen definiert, die keine realen Objekte darstellen, sondern den jeweiligen statistischen Mittelwert repräsentieren sollen. Die Anzahl der Gebäude je Gebäudetypus wird in Abhängigkeit von ausgewählten Merkmalen der bundesdeutschen Gebäude- und Wohnungszählung ermittelt (Ebel *et al.*, 1990). Im Rahmen des IKARUS-Projekts wurden Gebäudetypen für die neuen und alten Bundesländer sowie für Neubauten zusammengestellt (Gülec etal, 1994a), (Rosin *et al.*, 1994). Diese Gebäudetypen werden im folgenden verwendet.

Das Institut Wohnen und Umwelt (IWU) in Darmstadt hat für bis 1987 errichtete Gebäude 30 repräsentative Gebäudetypen für die alten Bundesländer zusammengestellt (Ebel *et al.*, 1990), (Gülec *et al.*, 1994a). Die Gebäudetypen sind in fünf Gebäudegruppen und acht Baualtersklassen unterteilt. Tabelle 18 zeigt die entstehende Gebäudetypenmatrix. Die Merkmale

Tabelle 19: Gebäudetypen für die neuen Bundesländer (Gülec*et al.*, 1994a)

Typ	**Baualter/Bauweise/Geschosse**					
Einfamilienhäuser EFHO	EFHOA bis 1918	EFHOB 1918-1945	EFHOC 1946-1970	EFHOD 1971-1985	EFHOE 1986-1989	
kleine Mehrfamilienhäuser KMHO	KMHOA bis 1918 Fachwerk	KMHOB bis 1918 Ziegelbau 2-3 Geschosse	KMHOC bis 1918 Ziegelbau 4-5 Geschosse	KMHOD 1919-1945 Ziegelbau 4-6 Geschosse	KMHOE 1946-1960 Ziegelbau 4-6 Geschosse	KMHOF 1961-1989 Block- und Streifenbau 4 Geschosse
große Mehrfamilienhäuser GMHO	GMHOA 1970-1985 Plattenbau 5-6 Geschosse					
Hochhäuser HOHO	HOHA 1970-1985 Plattenbau 11 Geschosse	HOHB 1970-1985 Plattenbau 18 Geschosse				

der GWZ87 und die Gebäudetypen der alten Bundesländer wurden im Rahmen der IKARUS-Studie wie folgt einander zugeordnet (Gülec*et al.*, 1994a):

- freistehende Einfamilienhäuser (EFHW): Wohngebäude mit einer Wohnung,
- Reihen- und Doppelhäuser (RDHW): Wohngebäude mit zwei Wohnungen,
- kleine Mehrfamilienhäuser (KMHW): Wohngebäude mit 3-6 Wohnungen,
- große Mehrfamilienhäuser (GMHW): Wohngebäude mit 7-12 Wohnungen und
- Hochhäuser (HOHW): Wohngebäude mit mehr als 12 Wohnungen.

Die Baualtersklassen entsprechen sich im wesentlichen.

Für die neuen Bundesländer wurden am Institut für Heizung, Lüftung und Grundlagen der Bautechnik (IHLGB) in Berlin für bis 1985/89 errichtete Gebäude 14 Gebäudetypen ermittelt (Rosin *et al.*, 1994). Dabei wird zwischen vier Gebäudegruppen, verschiedenen Baualtersklassen, Bauweise und Anzahl der Geschosse unterschieden (Rosin*et al.*, 1994). Da für die verschiedenen Gebäudegruppen keine einheitlichen Baualterklassen gewählt wurden, ergibt sich keine Matrix wie für die alten Bundesländer (Tabelle 19). Die nach 1946 gebauten Häuser sind im wesentlichen industriell errichtet. Sie unterscheiden sich durch Montageart und wärmetechnischen Standard.

Das Institut für Bauphysik (IBP) in Stuttgart hat sieben Gebäudetypen für Neubauten in den alten und neuen Bundesländern zusammengestellt (Gülec*et al.*, 1994a). Sie werden entsprechend der Anzahl der Wohnungen und des Baujahrs den Daten des Gebäude- und Wohnungsbestands zugeordnet:

- freistehendes Einfamilienhaus (EFHG): 1 Wohnung;
- Doppelhaushälfte (DHHG): 1 Wohnung;
- Reihenmittelhaus (RMHG): 1 Wohnung;
- Zweifamilienhaus (ZFHG): 2 Wohnungen;
- Kleines Mehrfamilienhaus (KMHG): 3-6 Wohnungen;
- Großes Mehrfamilienhaus (GMHG): 7-12 Wohnungen und
- Hochhaus (HOHG): mehr als 12 Wohnungen.

Für die drei Gebäudetypensätze wurden jeweils neben wärmetechnisch relevanten Eigenschaften die folgenden Flächenangaben spezifiziert:

- Bruttovolumen,
- Verhältnis Oberfläche zu Bruttovolumen,
- abgedeckte Bodenfläche,
- Fensterfläche,
- Dachgeschoßdecke.

Für die Ableitung eines Materialoberflächenkatasters sind jedoch weitergehende Angaben notwendig. Bisher wurde nur eine Erhebung von Materialoberflächen an repräsentativen Gebäuden in Deutschland bekannt (Hoos *et al.*, 1987). Dabei wurden die Materialoberflächen an 232 repräsentativen Wohngebäuden in Dortmund und Köln erfaßt. Dieser Erhebung liegen die Gebäudetypen je Siedlungstyp aus der Studie von Roth *et al.* (1980) zugrunde. Tabelle 20 zeigt die Spezifikation der Siedlungstypen der Roth-Studie; Tabelle 21 die in der Hoos-Studie erfaßten Materialoberflächen. Es zeigt sich, daß nicht alle Materialien bei den Gebäuden aller Siedlungstypen zum Einsatz kommen. Natursteine z.B. kommen im wesentlichen an Gebäuden des Siedlungstyps 7, Sandstein noch an Gebäuden der Siedlungstypen 6 und 8 vor.

Die Siedlungstyp-Gebäude werden den IKARUS-Gebäudetypen zugeordnet. In einigen Fällen ist eine solche Zuordnung nicht sinnvoll, Annahmen sind dann unumgänglich. Tabelle 22 faßt die Annahmen zusammen. Es mußt betont werden, daß regionale Unterschiede (z.B. zwischen Nord-, Süd- und Ostdeutschland) auf diese Weise nicht erfaßt werden können. Die Datenbasis erlaubt leider keine weitere Differenzierung.

Durch Multiplikation der Materialoberflächen je Gebäudetyp mit den Daten des Gebäudekatasters ergeben sich Oberflächenkataster für die verschiedenen Materialien. Tabelle 23 faßt die gesamtdeutschen Ergebnisse zusammen und vergleicht sie mit den Ergebnissen, wenn die Durchschnittswerte von Köln und Dortmund für jedes Gebäude unabhängig vom Gebäudetyp verwendet werden würde. Mit letzterer Vorgehensweise wird implizit für ganz Deutschland die gleiche Gebäudeverteilung wie in Dortmund und Köln angenommen. Es zeigt sich, daß es vor allem bei den Natursteinen große Abweichungen gibt.

Das Gebäudekataster und die Materialoberflächenkataster wurden in ArcInfo-Coverages und -Grids überführt. Beispielhaft zeigt Karte 53 die räumliche Verteilung des galvanisierten Stahls in Deutschland.

Tabelle 20: Spezifikation der Gebäudetypen je Siedlungstyp in der Studie von Roth *et al.* (1980) (ST = Siedlungstyp)

ST	Geschosszahl	Gebäude pro km²	Baualter	Dachform (Steil-/Flachdach [%])
1	Einfamilienhäuser niedriger Dichte und Mehrfamilienhäuser, die sich in der Bauform kaum von größeren Einfamilienhäusern unterscheiden. Typische Erkennungsmerkmale auf dem Kartenbild sind die minimalen Dimensionen der Baukörper, die niedrige Dichte und die Lage am Rand von Siedlungsgebieten.			
	1-2	400-800	1915-1948: 1/3; nach 1948: 2/3	100/0
2	historische Dorfkerne und dichte Einfamilienhaussiedlungen Die Dorfkerne sind gekennzeichnet durch eine hohe Dichte und ein Straßennetz, das mehr von topographischen Bedingungen als von geometrischen Vorstellungen geprägt ist. Die Einfamilienhaussiedlungen unterscheiden sich vom ST1 vor allem durch ihre höhere Dichte.			
	1,5-2,5	800-1600	vor 1915	100/0
3	Reiheneinfamilienhäuser. Auf dem Kartenbild sind sie durch eine dichte, parallele Anordnung und ein kleinmaschiges, rechtwinkliges Erschließungsnetz zu erkennen.			
	1,5-2,5	1000-2000	1915-1948: ¾; nach 1948: ¼	100/0
4	Zwei-, Drei- und Vierspänner mit drei bis fünf Geschossen Diesem Siedlungstyp läßt sich ein großer Teil der Nachkriegsbauten zuordnen. Entsprechend ihrem Baualter finden sich diese Gebäude vorwiegend am Stadtrand.			
	3-5	500-1000	nach 1948	85/15
5	hohe Zeilenbauten und Hochhäuser. Auf dem Kartenbild ist dieser Siedlungstyp an der weitläufigen Verteilung großer Gebäude erkennbar. Diese kommen praktisch nur in äußerster Randlage oder in neuen Stadtzentren vor.			
	6-15	360-870	nach 1948	0/100
6	Städtischen Mehrfamilienhäuser der Jahrhundertwende, die zusammen ganze Straßenblöcke bilden. Typische Merkmale der Blockbebauung sind die darin liegenden großen, zentralen Freiräume und die Hauptorientierung der Wohnungen auf die Straße. Entsprechend ihrem Baualter schließt dieser Blockbauweise direkt an den Stadtkern an.			
	3-4	800-1600	vor 1915: 60%, 1915-1948: 40%	100/0
7	Städtische Bauten, die Ende des 19. Jahrhunderts oder nach dem 2. Weltkrieg, während einer Phase wirtschaftlichen Aufschwungs, errichtet wurden In dichten Baublöcken zusammengedrängt, enthalten diese Gebäude vorwiegend Büros und Geschäfte. In den meisten Städten befindet sich dieser Siedlungstyp zwischen der mittelalterlichen Altstadt und den damals neugebauten Bahnhof.			
	4-6	1000-2000	vor 1915: ½, nach 1948: ½	50/50
8	mittelalterliche Altstadt Zentrale Lage, geschlossene Bauweise und verwickelte Erschließung sind eindeutige Merkmale dieses Siedlungstyps, wie dies die Kartenbilder deutlich zeigen. Ebenfalls typisch sind die hohe Bebauungsdichte und die verhältnismäßig hohen Gebäude.			
	3-5	2000-4000	vor 1915	100/0
9	sämtliche Industrie-, Lager- und Gewerbebauten Diese liegen meistens am Stadtrand und haben oft den Anschluß an das Bahnnetz. Diese beiden Merkmale gestatten eine eindeutige Identifikation auf dem Kartenbild.			
	2-4	200-400	vor 1915: ¼; 1915-1948: ½; nach 1948: ¼	40/60

Tabelle 21: Fläche [m^2] je Gebäude je Siedlungstyp, abgeleitet aus Ergebnissen von (Hoos *et al.*, 1987) für Gebäude in Dortmund und Köln

	Siedlungstyp									**Durchschnitt**	
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**Köln**	**Dortmd.**
Wandfläche	146,7	148,3	68,7	352,0	428,3	267,5	202,0	196,7	433,3		
Fensterfläche	26,7	16,7	15,3	88,0	285,6	66,7	67,3	65,7	233,3		
Dachfläche	146,7	114,2	88,0	181,3	118,0	150,0	173,3	175,0	1000		
Galvanisierter Stahl	5,0	3,3	2,7	5,3		4,2	3,3	5,3	13,3	4	5
Zink	21,7	17,5	10,0	32,0	9,5	30,0	20,7	35,0	60,0	21	25
Verwitterungsbeständiger Stahl											
Aluminium	3,3	1,7	2,0	12,0	49,5	1,7	48,0		116,7	10	13
Sandstein						2,5	12,7	29,7		0,5	2
Kalkstein							24,0			0,4	1
Andere Natursteine							16,0			0,3	0,7
Beton	3,3	3,3	1,3	38,7	163,8		12,0		70,0	11	13
Anstriche	80,0	76,7	52,7	112,0	262,7	139,2	85,3		183,3	89	103
• Kunstharzfarben	10,0	6,7	20,7	21,3	118,0	20,8	10,7	40,0	10,0		
• Dispersionslackfarben	5,0	5,0	2,0	6,7	11,5	8,3	4,0	8,0	13,3		
• Dispersionsfarben	65,0	65,0	30,0	84,0	133,3	110,0	70,7	106,4	160,0		
Putz	30,0	30,8	14,0	193,3		117,5	20,0		30,0	52	70
Backstein	23,3	23,3	10,7							15	10
Asbestzement									216,7	11	14
Kunststoff	5,0	2,5	10,7	18,7		20,0	5,3		13,3	8	11
Zementdachziegel	120,0	93,3	72,0	145,3		52,5	60,7		120,0	91	86
Tondachziegel	6,7	5,8	4,7			97,5			40,0	16	31
Flachdach	18,3	15,0	11,3	36,0	120,0		112,7		680,0	50	63
Weitere	21,7	21,7	11,3	28,0	116,2	38,3	27,3	14,0	83,3		

Tabelle 22: Grundlagen der Zuordung von Materialoberflächen je Gebäude je Gebäudetyp (ST = Siedlungstyp)

Gebäudetyp-Kürzel	**Quelle/Bezug**
EFHWA	ST8
EFHWB	ST2
EFHWC-H	ST1
RDHWB-H	ST3
KMHWA	½ ST6, ½ ST8
KMHWB	½ ST6, ½ ST7
KMHWC	ST6
KMHWD-H	½ ST4, ½ ST7
GMHWB	ST7
GMHWC	ST6
GMHWD-F	20% ST4, 20% ST5, 60% ST7
HOHWE-F	ST5
EFHOA	ST2
EFHOB	ST1
EFHOC-E	ST1
KMHOA	ST8
KMHOB	ST6
KMHOC-D	ST4
KMHOE	½ ST4 ½ ST5
KMHOF	80% der Oberfläche von ST4
GMHOA	80% der Oberfläche von ST4/5
HOHA	80% der Oberfläche von ST5
HOHB	80% der Oberfläche von ST5*18/11
EFHG	ST1
RMHG	ST3
ZFHG	ST1
KMHG	½ ST1, ½ ST4
GMHG	ST4
HOHG	½ ST4, ½ ST5

Tabelle 23: Für Deutschland quantifizierte Materialflächenan Wohngebäudeaußenflächen im Jahr 1995

Material	**Ableitung über Gebäudetyp**	**Ableitung über Durchschnitt von Köln und Dortmund**
Galvanisierter Stahl	81,4 Mio. m^2	87,7 Mio. m^2 (108%)
Zink	430 Mio. m^2	471 Mio. m^2 (110%)
Aluminium	293 Mio. m^2	235 Mio. m^2 (80%)
Sandstein	80,3 Mio. m^2	22,4 Mio. m^2 (28%)
Kalkstein	85,3 Mio. m^2	14,3 Mio. m^2 (17%)
Andere Natursteine	56,9 Mio. m^2	10,2 Mio. m^2 (18%)
Putz	884 Mio. m^2	1240 Mio. m^2 (140%)
Anstriche	1820 Mio. m^2	1965 Mio. m^2 (108%)
Beton	333 Mio. m^2	245 Mio. m^2 (74%)

7.4 Quantifizierung

7.4.1 Die Dosis-Wirkungsbeziehungen

In Kapitel 5 wurde dargestellt, wie die Korrosionsverluste für die augenblickliche Schadstoffbelastung (1993-1995 gemittelt) bestimmt wurden. Die Korrosionsraten wurden für die Materialien Kupfer, Bronze, Sandstein, Kalkstein, verwitterungsbeständigen Stahl, Zink, Aluminium, Nickel, Zinn, Glas und zwei verschiedene Anstrichsysteme berechnet. Dabei liegen der Berechnung drei Sätze von Dosis-Wirkungsbeziehungen zugrunde:

1. Schadensfunktionen des Umweltbundesamts für alle genannten Materialien außer Aluminium, Nickel, Zinn, Glas und Anstriche,
2. offizielle Schadensfunktionen des ICP-Materials-Programms für alle genannten Materialien und
3. die Schadensfunktionen des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege für Kupfer und Bronze.

Ein Vergleich der genannten Materialien mit den in Tabelle 23 für die Außenflächen von Wohngebäuden aufgeführten zeigt, daß einige Materialien, für die es Wirkungsbeziehungen gibt (Kupfer, Bronze, verwitterungsbeständiger Stahl), bei Wohngebäuden nicht verwendet werden – zumindest nicht in nennenswerten Umfang. Dagegen stehen für einige der quantitativ wichtigsten verwendeten Materialien (Anstriche, Beton und Putz) keine, oder nur uneingeschränkt Dosis-Wirkungsbeziehungen zur Verfügung. Die beiden Dosis-Wirkungsbeziehungen für Anstrichsysteme wurden aus Expositionsversuchen mit einem Alkyd-Melamin-Anstrich auf verzinktem Stahlblech bzw. mit Silizium-Alkyd-Anstrich auf Stahlplatten abgeleitet. Diese Anstrichsysteme sind nicht repräsentativ für die an Wohngebäuden eingesetzten.

Aber auch bei den verwendeten Materialien, für die Wirkungsfunktionen zur Verfügung stehen, muß bedacht werden, daß die Anwendung der Funktion für z.B. Mansfield Sandstein auf alle Sandsteine bereits eine Verallgemeinerung enthält. Solche Pauschalisierungen sind aber praktisch unumgänglich, um überhaupt Materialschäden quantifizieren zu können.

Hier werden die Dosis-Wirkungsbeziehungen wie folgt verwendet:

- Die Zink-Funktionen werden auf Zink und galvanisierten Stahl angewandt.
- Die Aluminium-Funktion wird auf Aluminium angewandt.
- Die Kalkstein-Funktionen werden auf Kalkstein angewandt.
- Die Sandstein-Funktionen werden auf Sandstein, andere Natursteine sowie Putz angewandt. Der Anwendung auf Putz liegt die Annahme zugrunde, daß Putz einen beträchtlichen Anteil Kalzit enthält und mit Sandstein vergleichbare Schadensmechanismen vorliegen (European Commission, 1995), (Short, 1994). Es muß allerdings betont werden, daß dies eine sehr weitgehende Verallgemeinerung darstellt.
- Die beiden Anstrich-Funktionen werden auf Anstriche angewandt, um eine mögliche Größenordnung zu veranschaulichen. Zu großes Gewicht sollte allerdings nicht auf diese Ergebnisse gelegt werden. Die berechneten Schadenskosten werden nicht zur Summe der Schadenskosten hinzugerechnet.

Für zwei quantitativ wichtige Materialien – Anstriche und Beton – stehen damit praktisch keine Funktionen zur Verfügung und können auch nicht oder nur bedingt aus den bestehenden abgeleitet werden. Anstriche sind sicherlich durch säurebildende Schadstoffe und Ozon stark gefährdet, wogegen die Gefährdung von Beton durch Luftschadstoffe bei Fachleuten umstritten ist (s. z.B. (European Commission, 1995)).

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der in diese Schadensabschätzung nicht eingeht, ist die Verschmutzung von Materialien durch Partikel. Für diese Schadensart liegen keine geeigneten Dosis-Wirkungsbeziehungen vor.

Mit einigen der Dosis-Wirkungsbeziehungen wird die Korrosion als Dickeverlust in µm berechnet, andere hingegen berechnen die Korrosion als Materialabtrag in g/m². Dann errechnet sich der Dickeverlust mit Hilfe der jeweiligen Dichte des Materials aus dem Materialabtrag.

Mit den Anstrichgleichungen werden ASTM-Bewertungen berechnet, die die verbleibende Qualität eines Anstriches anzeigen. Für einen frischen Anstrich ist der ASTM-Wert gleich 10 und für einen vollständig abgenutzten gleich 1.

7.4.2 Instandsetzungskriterien und -kosten

Wie in Abschnitt 7.2.2 dargestellt, gehört zur physischen Schadensfunktion nicht nur eine Dosis-Wirkungsbeziehung sondern auch das Instandsetzungskriterium für die Eigentümer und Eigentümerinnen der Sachgüter. Gerade zu den Instandsetzungskriterien sind nur wenige empirische Daten bekannt. Z.B. wurden 1970 in drei US-amerikanischen Städten sowohl die tatsächlichen Instandhaltungsintervalle zwischen zwei Hausanstrichen erhoben und - anhand der Staubbelastung - in Bezug zu den wahrscheinlichen Verschmutzungsgraden gesetzt (Haynie, 1986). Yates *et al.* stellten bei einer Erhebung fest, daß der Besitzstand des betroffenen Gebäudes die Ausgaben (und damit die Instandsetzungshäufigkeit) praktisch nicht beeinflußt (Yates *et al.*, 1997). Solche Erhebungen sind aber die Ausnahme. Im allgemeinen werden bei ökonomischen Schadensabschätzungen von Fachleuten ihrer Ansicht nach wahrscheinliche oder notwendige kritische Materialabträge vorgegeben. In manchen Fällen wird noch ein Abgleich durchgeführt, ob mit der verwendeten Schadensfunktion und den gegebenen Luftbelastungen für den gewählten kritischen Materialabtrag sich allgemein übliche Instandsetzungsintervalle ergeben (s. z.B. (McCarthy *et al.*, 1984)). Dieses Vorgehen wird immer wieder als unzureichend bezeichnet, da diese „idealen“ kritischen Materialabträge nicht unbedingt mit den „realen“ kritischen Materialabträgen übereinstimmen, die sich aus den Präferenzen der Individuen ergeben. Nur mittels der realen kritischen Materialabträge lassen sich aber die von den Betroffenen tatsächlich aufgewendeten Instandhaltungskosten bestimmen (UBA, 1986). Sozio-ökonomische Erhebungen, die den Zusammenhang zwischen Zustand der Materialoberfläche und Instandhaltung untersuchen, wären wünschenswert. Da Ergebnisse solcher Erhebungen aber nicht zur Verfügung stehen, werden hier die kritischen Materialabträge in ähnlicher Weise aus bisher veröffentlichten Studien und Aussagen von Fachleuten abgeleitet.

Basierend auf Angaben von Short (1994) sowie Ergebnissen einer Studie in drei Städten (Stockholm, Sarpsborg, Prag) (Kucera *et al.*, 1993) wurden kritische Materialabträge je Materialkategorie abgeleitet. Für die verschiedenen Anwendungen von galvanisierten Stahl ergaben sich kritische Materialabträge um die 25 µm und für Aluminium zwischen 50 und 100 µm. Für Natursteine und Putz würden sich so kritische Abtragsdicken von ca. 70 µm ergeben. Hier werden konservativere Werte von 3 bis 5 mm angenommen, da davon ausgegangen wird, daß sich die geringeren kritischen Dicke aufgrund der Verschmutzung der Oberflächen ergeben, hier aber Korrosionsschäden untersucht werden. All diese Instandsetzungskriterien gelten für eine gleichmäßige Korrosion, welche auch mit den Schadensfunktionen berechnet wird. Für Anstriche wird in (UN ECE, 1998) ein ASTM-Wert von 5 als Auslöser für eine Instandsetzung vorgeschlagen. Dieser Wert wurde hier verwendet.

Tabelle 24: Verwendete kritische Dicken sowie flächenspezifischen Instandsetzungskoste inkl. Bandbreiten für die Sensitivitätsanalyse

	Kritische Dicke [µm]	**Instandsetzungskosten [DM/m²]**
Galvanisierter Stahl	25 (15–35)	50 (30–70)
Zink	2000 (1500–2500)	35 (25–45)
Aluminium	75 (50–100)	80 (70–90))
Natursteine	4000 (3000–5000)	500 (380–600)
Putz	4000 (3000–5000)	50 (40–60)
Anstriche	5*	50 (40–60)

* ASTM-Wert

Für die ökonomische Schadensfunktion werden neben der physischen Schadensfunktion und dem Materialinventar auch die (flächen-) spezifischen Instandsetzungskosten benötigt. Diese spezifischen Kosten variieren stark, je nachdem welches Material für welche Anwendung eingesetzt wird. Hier können nur allgemeine Durchschnittswerte verwendet werden. Auch die spezifischen Kosten basieren auf Angaben von Fachleuten sowie bisherigen Veröffentlichungen (Short, 1994), (Kucera *et al.*, 1993), (Köneke, Köneke, 1988).

Tabelle 24 faßt die verwendeten kritischen Dicken und flächenspezifischen Instandsetzungskosten zusammen. Außerdem werden die Bandbreiten für beide Einflußfaktoren gezeigt, die in der Sensitivitätsanalyse verwendet werden.

7.4.3 Quantifizierte Schadenskosten an Wohngebäuden

Mit der in Abschnitt 7.2.4 beschriebenen Methodik, den genannten Dosis-Wirkungsbeziehungen (Abschnitt 7.4.1), den Eingangsdaten aus Abschnitt 7.4.2 sowie den in Abschnitt 7.3 hergeleiteten Materialkataster werden die anthropogen verursachten Schäden an Wohngebäuden in Deutschland für die Jahre 1993 bis 1995 quantifiziert. Tabelle 25 faßt die quantifizierten jährlichen Instandsetzungsflächen und -kosten für die beiden Funktionssätze (UBA und ICP) zusammen.

Ohne die Anstriche werden jährliche Schadenskosten von 430 (ICP) bzw. 360 (UBA) Mio. DM quantifiziert. Bezogen auf die Gesamtbevölkerung in Deutschland von ca. 80 Mio. Menschen ergeben sich daraus jährliche Instandsetzungskosten von ca. 5 DM pro Kopf. Die Unterschiede in den Ergebnissen zwischen den beiden Funktionssätzen sind gering. Die Gesamtsumme unterscheidet sich im wesentlichen durch die für Aluminium quantifizierten Schäden, da keine UBA-Gleichung für Aluminium vorliegt. Dies zeigt, daß es zumindest für den deutschen Raum unerheblich ist, ob bei der Herleitung einer Dosis-Wirkungsbeziehung für prognostische Zwecke die Temperatur und die relative Feuchte berücksichtigt werden oder nicht.

Es zeigt sich, daß - abgesehen von den Anstrichen - zu den quantifizierten Schadenskosten die galvanisierten Stahlflächen am stärksten beitragen. Für galvanisierter Stahl ergibt sich – aufgrund der vergleichsweise geringen kritischen Dicke – ein großer Instandsetzungsanteil von knapp 4% und daher vergleichsweise hohe Kosten. Der Instandsetzungsanteil für die anderen Materialien ist dagegen mit 0,03 bis 0,3% relativ gering.

Tabelle 25: Quantifizierter Anteil der Materialflächen an Wohngebäuden, die wegen der Luftbelastung in den Jahren 1993 bis 1995, pro Jahr instandgesetzt werden müssen sowie resultierende jährliche Instandsetzungskosten (n. q. nicht quantifiziert)

	Gesamt-fläche [Mio. m2]	**UBA-Gleichungen**		**ICP-Gleichungen**	
		Instandset-zungsanteil [%/a]	**Instandset-zungkosten [Mio. DM/a]**	**Instandset-zungsanteil [%/a]**	**Instandset-zungkosten [Mio. DM/a]**
Galv. Stahl	81	3,7%	149	3,5%	143
Zink	430	0,05%	7	0,04%	7
Aluminium	293	n.q.	n.q.	0,3%	60
Sandstein	80	0,1%	49	0,1%	52
Kalkstein	85	0,1%	57	0,2%	72
Andere Natursteine	57	0,1%	36	0,1%	37
Putz	884	0,1%	62	0,1%	63
Anstriche	1822	n.q.	n.q.	(5–12%)	(4700–10600)
Beton	333	n.q.	n.q.	n.q.	n.q.
Summe			*359*		*433 (5100–11000)*

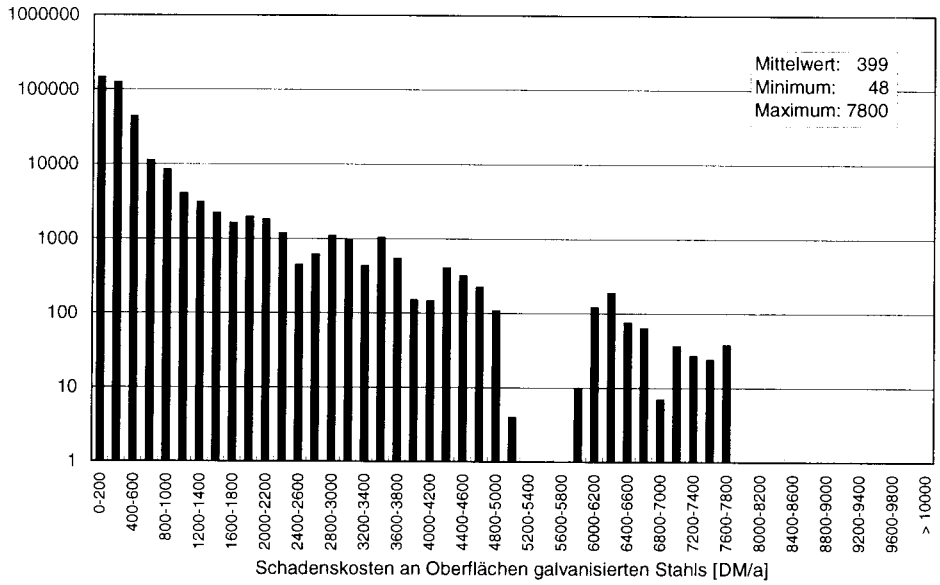

Abb. 4: Histogramm der mit der ICP-Gleichung quantifizierten Schadenskosten für galvanisierten Stahl

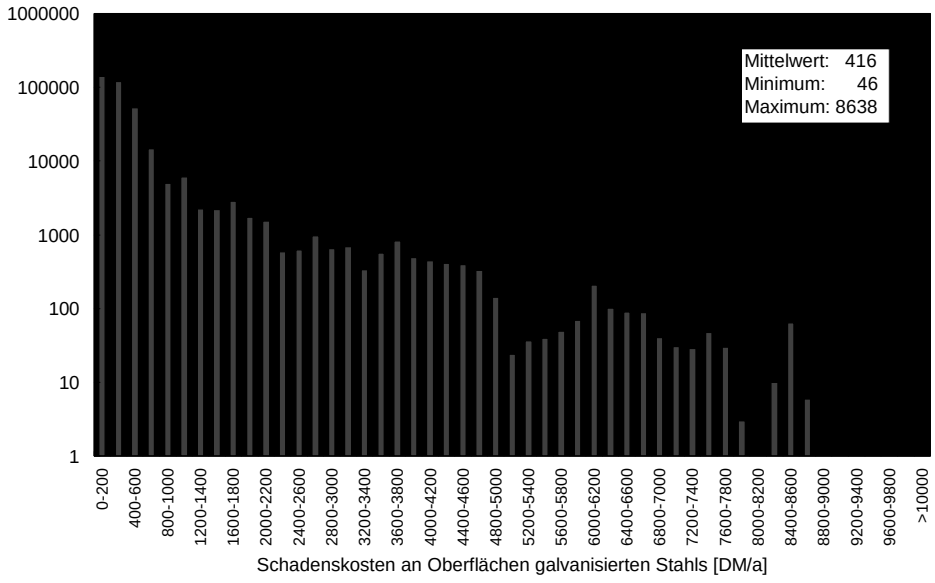

Abb. 5: Histogramm der mit der UBA-Gleichung quantifizierten Schadenskosten für galvanisierten Stahl

Abb. 4 und Abb. 5 zeigen die Häufigkeitsverteilungen der Schadenskosten in Deutschland für galvanisierten Stahl für die beiden Dosis-Wirkungsfunktionen. Abb. und Abb. die entsprechenden Verteilungen für alle Natursteine zusammengefaßt. Es zeigt sich, daß bei den gezeigten statistischen Kenngrößen (Mittelwert, Maximum, Minimum) die Werte für die beiden Funktionen nur wenig voneinander abweichen. Auch der Verlauf der Verteilungen unterscheidet sich nur wenig - mit Ausnahme des „Lochs“ bei ca. 5500 DM/Jahr bei den ICP-Ergebnissen für galvanisierten Stahl, das sich durch ein „zufälliges“ Zusammentreffen

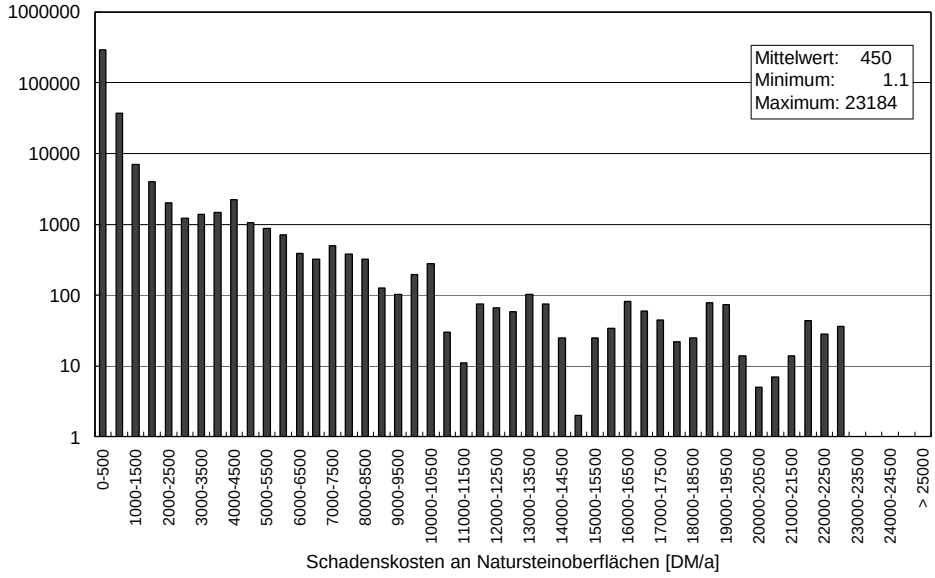

Abb.6: Histogramm der mit der ICP-Gleichung quantifizierten Schadenskosten für alle Natursteine zusammen

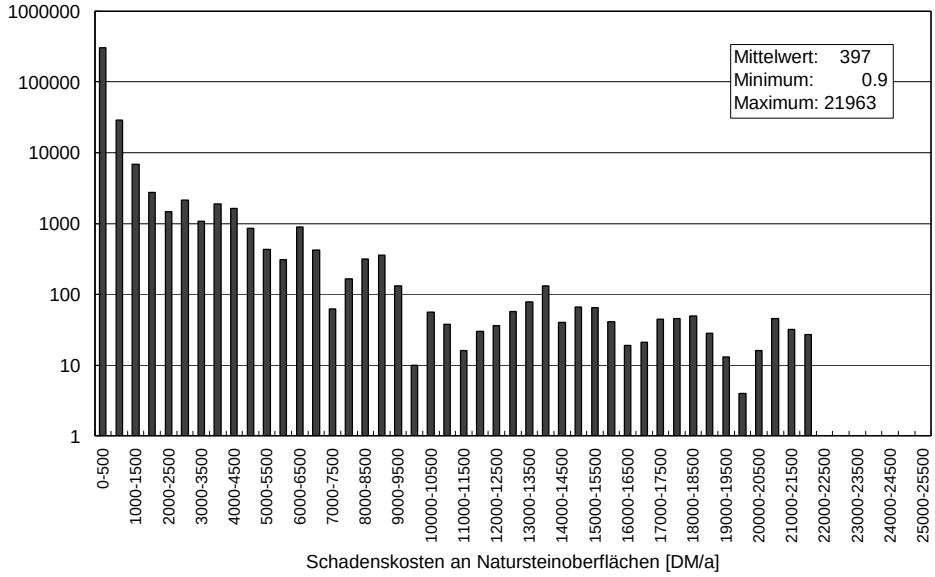

Abb.7: Histogramm der mit der UBA-Gleichung quantifizierten Schadenskosten für alle Natursteine zusammen

entsprechender Eingangswerte ergibt. In den Histogrammen der jeweiligen Eingangswerte (Materialinventar, aktuelle Korrosionsrate) tritt kein derartiges „Loch“ auf.

Karte 54 und Karte 55 zeigen die räumliche Verteilung der Instandsetzungskosten in Deutschland. In weiten Teilen Deutschlands werden ohne die Anstrichschäden jährliche Schadenskosten von bis zu 500 DM pro km^2 Kreisfläche quantifiziert. In Nordrhein-Westfalen, im Saarland, in fast ganz Hessen sowie in beträchtlichen Teilen Niedersachsens,

Tabelle 26: Schadenskosten, die mit den ICP-Gleichungen für das Materialkataster berechnet werden, bei dem die Durchschnitte von Dortmund und Köln auf ganz Deutschland extrapoliert werden (s. Tabelle 23)

	Schadenskosten	
	[Mio. DM/Jahr]	**bezogen auf Ergebnisse für Gebäudetypenmaterial-kataster**
Galv. Stahl	154	108%
Zink	7	109%
Aluminium	72	80%
Sandstein	15	29%
Kalkstein	12	17%
Andere Natursteine	7	18%
Putz	84	134%
Summe	*351*	*76%*

Baden-Württembergs und Rheinland-Pfalz werden Schadenskosten von 500 bis 5000 DM/km^2 quantifiziert. Die niedrigsten Werte ergeben sich für Mecklenburg-Vorpommern mit Schadenskosten von fast durchweg unter 100 DM/km^2. Die höchsten Schäden pro km^2 ergeben sich für das Ruhrgebiet (bis zu 46000 DM/km^2) bzw. für den Köln-Bonner Raum (bis zu 23000 DM/km^2) und für Stuttgart (bis zu 20000 DM/km^2). Andere Verdichtungsräume mit relativ hohen maximalen Kosten (14000–16000 DM/km^2) sind z.B. der Großraum Frankfurt, Berlin, Bremen und Kassel.

Die quantifizierten Anstrichschäden betragen mit 5000 bis 11000 Mio. DM ein Vielfaches der Summe der relativ sicher quantifizierten Schadenskosten. Es muß aber noch einmal betont werden, daß die Dosis-Wirkungsbeziehungen für ganz andere Anstrichsysteme entwickelt wurden, als an Außenflächen von Wohngebäuden im allgemeinen verwendet werden. Die Anstrichschäden werden daher nicht zur Summe der Schadenskosten hinzugezählt. Die hohen quantifizierten Schäden ergeben sich zum einen aus der relativen Empfindlichkeit der Anstriche, für die die Dosis-Wirkungsbeziehung eigentlich gelten, zum anderen aus der großen Gesamtfläche von Anstrichen an Wohngebäuden. Die hier quantifizierten Beträge verdeutlichen einmal mehr, daß Dosis-Wirkungsbeziehungen für an Wohngebäuden typischen Anstrichsysteme dringend benötigt werden.

7.4.4 Sensitivitätsanalyse

Hier soll keine formale Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, aber der Einfluß verschiedener Faktoren auf die Ergebnisse untersucht und Unsicherheiten aufgezeigt werden.

In Abschnitt 7.3.2 wurde zum Vergleich ein Materialkataster hergeleitet, das auf den durchschnittlichen Materialoberflächen pro Gebäude in den Städten Dortmund und Köln beruht (s. Tabelle 23). Tabelle 26 zeigt nun, welche Schadenskosten für die ICP-Gleichungen mit diesem Materialoberflächenkataster berechnet werden und vergleicht sie mit den Ergebnissen für das mittels Gebäudetypen hergeleiteten Katasters. In der Summe ergeben sich knapp 25% geringere Schadenskosten. Im einzelnen weichen besonders die Ergebnisse für die Natursteine und Putz stark voneinander ab. Ein Vergleich von Tabelle 26 mit Tabelle 23 zeigt, daß die Unterschiede sich zum größten Teil direkt aus den zahlenmäßigen Unterschieden der Materialkataster ergeben und weniger aus einer unterschiedlichen Verteilung der Materialien.

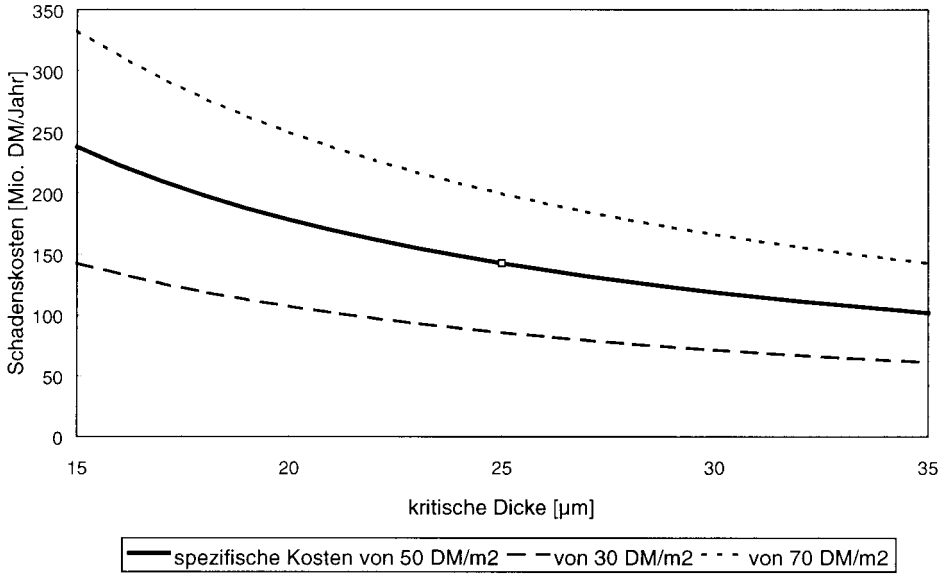

Abb.8: Variation der mit der ICP-Gleichung quantifizierten Schadenskosten für galvanisierten Stahl mit der kritischen Dicke sowie den flächenspezifischen Instandsetzungskosten

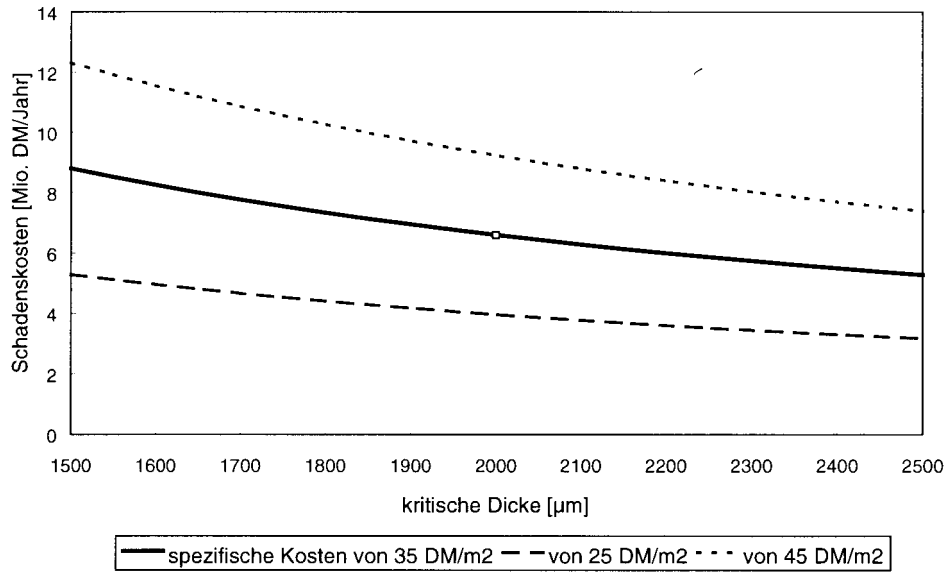

Abb.9: Variation der mit der ICP-Gleichung quantifizierten Schadenskosten für Zink mit der kritischen Dicke sowie den flächenspezifischen Instandsetzungskosten

Die kritische Dicke und die flächenspezifischen Instandsetzungskosten werden im Rahmen der in Tabelle 24 genannten Bandbreiten variiert. Mit dieser Vorgehensweise wird allerdings nicht die grundsätzliche Frage berührt, ob kritische Dicke der richtige Indikator für das Instandsetzungskriterium ist. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bis Abb. zeigen die Variation der Ergebnisse für die verschiedenen Materialien. Während die Höhe der quantifizierten Schäden logischerweise proportional zu den spezifischen Instand-

setzungskosten ist, ist die Abhängigkeit von der kritischen Dicke eine Hyperbelfunktion. Die beiden Faktoren verursachen Bandbreiten von etwa ±50% bei den Schadenskosten.

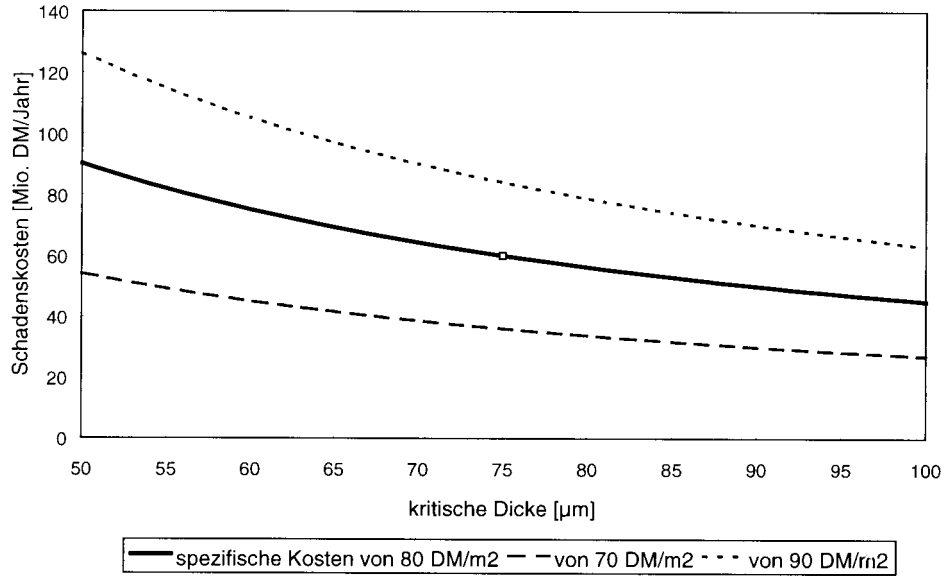

Abb.10: Variation der mit der ICP-Gleichung quantifizierten Schadenskosten für Aluminium mit der kritischen Dicke sowie den flächenspezifischen Instandsetzungskosten

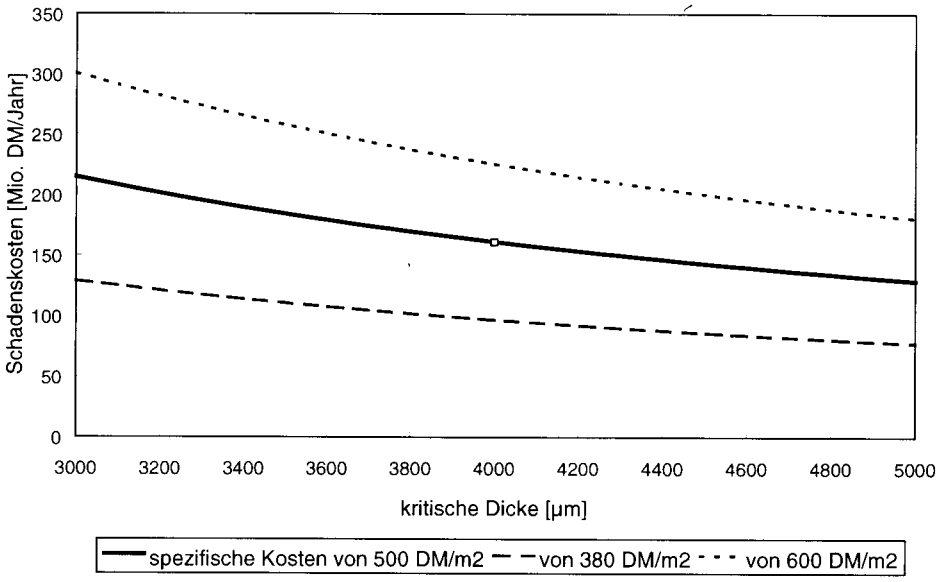

Abb.11: Variation der mit den ICP-Gleichungen quantifizierten Schadenskosten für Naturstein mit der kritischen Dicke sowie den flächenspezifischen Instandsetzungskosten

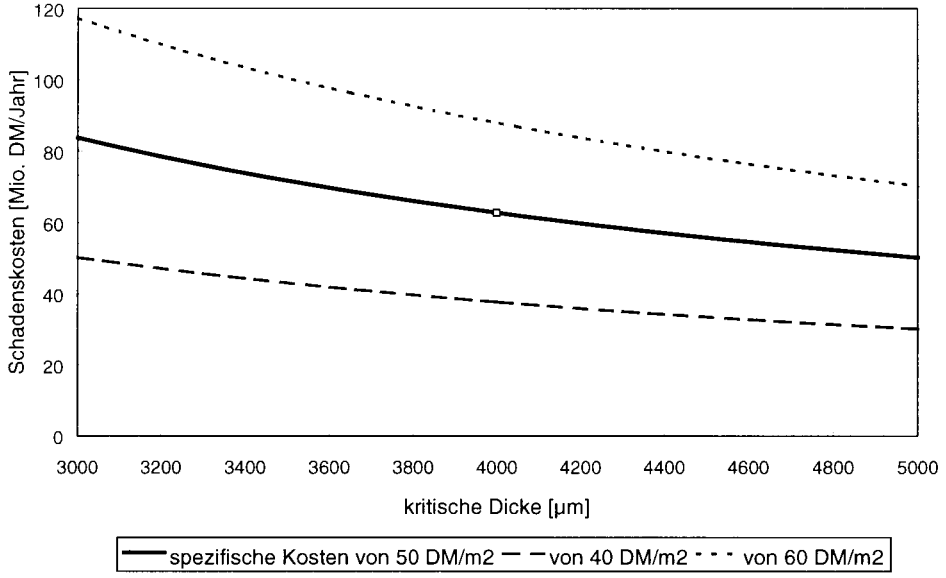

Abb.12: Variation der mit der ICP-Gleichung quantifizierten Schadenskosten für Putz mit der kritischen Dicke sowie den flächenspezifischen Instandsetzungskosten

Ein weiterer Aspekt ist die Korrosion, die nicht von anthropogenen Luftschadstoffemissionen verursacht wird, sondern auf die natürliche Verwitterung sowie natürliche Luftschadstoffemissionen (z.B. Chlorid aus dem Meer, Schwefeleintrag in die Atmosphäre bei Vulkanausbrüchen) zurückzuführen ist. Diese Hintergrundkorrosion hängt stark von den klimatischen Bedingungen ab und unterscheidet sich daher von Standort zu Standort. Die hier verwendeten Dosis-Wirkungsbeziehungen eignen sich leider nicht dafür, den nichtanthropogenen Anteil der Korrosion zu identifizieren, da die zugrundeliegenden Messungen nicht dafür ausgelegt waren. Behelfsweise wird hier daher auf die im Rahmen des UN-ECE ICP Materials Programms ermittelten Hintergrundkorrosionsraten zurückgegriffen (s. Tabelle 6 in Kapitel 6). Diese Hintergrundkorrosionsraten sind zeit-, klima- und standortunabhängig und spiegeln die mittlere Korrosionsrate in Reinluftgebieten wieder. Unter Berücksichtigung der Hintergrundkorrosionsraten sinkt die Höhe der quantifizierten Kosten auf 200 Mio. DM ab (ohne Anstrichschäden), das sind knapp 50% der Schäden inkl. Hintergrundkorrosion (s. Tabelle 27).

In den bisher vorgelegten Zahlen wurden keine Diskontrate berücksichtigt wurde, was im Grunde der Annahme einer Diskontrate von 0% entspricht (s. Abschnitt 7.2.2). Bei den derzeitigen Korrosionsraten ergeben sich Lebensdauern von mehr als 100 Jahren, was bedeuten würde, daß bei einer angenommen Diskontrate von 3% die Schäden nur ein Viertel oder weniger der nicht diskontierten Schäden betragen würden. Allerdings wird die Lebensdauer nicht nur durch Korrosion sondern auch durch andere Schäden (z.B. Verschmutzung) und Erwägungen beeinflußt und ist nur in Ausnahmefällen wirklich so lang. In der Praxis dürfte das Instandsetzungsintervall einer Außenwand eines Wohngebäudes selten 100 Jahre überschreiten, der diskontierte Schaden dürfte daher bei 50 bis 80% des nicht diskontierten Schadens liegen (s. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Dieser Anteil könnte nur unter der Verwendung weiterer Annahmen über die zukünftige Entwicklung bei dem Materialinventar, bei Luftbelastung usw. genauer abgeschätzt werden.

Die Bandbreiten bei den quantifizierten Schadenskosten mögen auf den ersten Blick sehr groß erscheinen. Wichtig ist jedoch, daß die Größenordnung der jährlichen Schadenskosten

Tabelle 27: Schadenskosten, die mit ICP-Gleichungen unter Abzug der Schäden durch Hintergrundkorrosion (s. Tabelle 6) berechnet werden

	Schadenskosten	
	[Mio. DM/Jahr]	**bezogen auf Ergebnisse inkl. Hintergrundkorrosion**
Galv. Stahl	63	44%
Zink	3	44%
Aluminium	38	63%
Sandstein	20	38%
Kalkstein	35	48%
Andere Natursteine	15	39%
Putz	28	44%
Summe	*201*	*46%*

für die betrachteten Materialien an Wohngebäuden in den Jahren 1993–1995 identifiziert werden kann. Da die Schäden an Anstrichen und Beton, Schäden durch Verschmutzungen sowie der kulturelle Wertverlust nicht oder nur bedingt quantifiziert werden können, sind die hier quantifizierten Schäden eher als Untergrenze der tatsächlichen Schäden an Wohngebäuden aufzufassen.

7.4.5 Vergleich mit früheren Studien

Ein Vergleich mit der letzten Abschätzung der Materialschäden in Deutschland gestaltet sich wegen der unsicheren Schadenskosten für Anstriche schwierig. Die letzte Studie zu Materialschäden in Deutschland wurde von Iseckeet *al.* (1990) vorgelegt, die wiederum auf einer älteren Studie von Heinz (1983) beruhte. Iseckeet *al.* hatten in ihrer Studie jährliche Instandsetzungskosten durch die Luftbelastung an Wohngebäuden in den alten Bundesländern von 3,12 Mrd. DM quantifiziert. Das ist ca. das 10-fache der hier *relativ sicher* quantifizierten Kosten, jedoch nur ca. die Hälfte, wenn die mit hohen Unsicherheiten behafteten Anstrichschäden hinzugenommen werden. Iseckeet *al.* hatten in ihrer Studie noch deutlich höhere SO_2-Konzentrationen zugrundegelegt (über 30 µg/m^3 bzw. über 50 µg/m^3). Außerdem verwendeten sie einen Regionaldifferenzierungsansatz (s. Abschnitt 7.2.1) und schätzten die Schadenskosten anhand der Angaben einzelner Wohnungsbauunternehmen zu Instandsetzungsintervallen ab. Dies hatte zur Folge, daß im Unterschied zu der Abschätzung hier alle Materialien an den Wohngebäuden und alle Effekte durch die Luftbelastung (also auch Verschmutzungseffekte) einbezogen wurden.

7.5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde eine fortschreibbare Methode zur ökonomischen Abschätzung der Schäden durch Luftverschmutzung an Wohngebäuden entwickelt, die auf den im Rahmen des ICP Materials-Forschungsprogramms erarbeiteten Dosis-Wirkungsbeziehungen beruht. Ein wesentlicher Teil der Entwicklung der Methode war die Erstellung eines Gebäudekatasters und eines Materialkatasters für das Jahr 1995, das ebenfalls fortgeschrieben werden kann. Diese Kataster könnten auch bei einer Level II-Analyse der Toleranzgrenzwerte von Materialien nützlich sein.

Mit dem Ansatz werden für den Bezugszeitraum 1993-1995 für Wohngebäude in Deutschland jährliche Schadenskosten von 430 Mio. DM quantifiziert. Bezogen auf die Gesamtde-

völkerung in Deutschland von ca. 80 Mio. Menschen ergeben sich daraus jährliche Instandsetzungskosten von ca. 5 DM pro Kopf. Zu den quantifizierten Schadenskosten tragen die galvanisierten Stahlflächen am stärksten bei. In den meisten Gebieten Deutschlands werden jährliche Schadenskosten von bis zu 5000 DM pro km^2 Kreisfläche quantifiziert. Die höchsten Schäden pro km^2 ergeben sich für das Ruhrgebiet (bis zu 46000 DM/km^2). Andere Verdichtungsräume mit relativ hohen maximalen Kosten (14000–23000 DM/km^2) sind der Raum um Köln-Bonn, Stuttgart, der Großraum Frankfurt, Berlin, Bremen, und Kassel.

Einige Schadensfälle können nicht quantifiziert werden, weil Modelle bzw. Daten nicht zur Verfügung stehen. Dementsprechend gibt es in einigen Punkten Forschungsbedarf, um die ökonomische Abschätzung von Materialschäden zu verbessern:

- Es fehlen Dosis-Wirkungsbeziehungen für Anstriche und Beton, die ökonomisch von großer Bedeutung sind.
- Weiterhin stehen im Moment keine quantitativen Wirkungsbeziehungen zur Abschätzung des Beitrags von Partikeln zur Verschmutzung von Hausfassaden u.ä. zur Verfügung.
- Das Materialkataster beruht auf der Erhebung an Gebäuden in Dortmund und Köln. Dies ist problematisch, da klimatische, ökonomische und kulturelle Faktoren den Baustil und die Wahl von Materialien für Wohngebäude entscheidend beeinflussen. Bestandsaufnahmen von repräsentativen Gebäuden in verschiedenen Teilen Deutschlands würden daher die Belastbarkeit der Ergebnisse verbessern.
- Es gibt bisher praktisch keine empirischen Daten dazu, welche Faktoren die Entscheidung privater Eigentümer beeinflussen, wann sie ihre Häuser instandsetzen lassen.
- In dem Wohngebäudekataster sind auch Häuser enthalten, denen ein besonderer kultureller Wert zugeschrieben wird. Die Schäden durch Luftbelastung an solchen Gebäuden sind in vielen Fällen durch die Instandsetzungskosten nicht abgedeckt. Gerade auf dem Gebiet der ökonomischen Abschätzung des kulturellen Wertverlusts durch Luftverschmutzung wurden bisher nur sehr vereinzelt Studien durchgeführt.

8 Zusammenfassung

Die „Kartierung von Toleranzgrenzwerten der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien in Deutschland“ basiert auf Ergebnissen eines achtjährigen Expositionsversuchs. An 39 Versuchsstandorten in 14 Ländern wurden Testplatten verschiedener an Kunst- und Bauwerken verwendeter Materialien unter standardisierten Bedingungen den an den jeweiligen Standorten herrschenden Klima- und Luftschadstoffbedingungen ausgesetzt. Die Versuchsanordnung ließ sowohl einen offenen als auch einen regengeschützten Angriff auf die Materialien zu. Nach 1-, 2-, 4- und 8-jähriger Expositionsdauer wurden einzelne Proben der Testplatten hinsichtlich der an ihnen aufgetretenen Korrosionserscheinungen untersucht. Die an den Exponaten festgestellten Korrosionsschäden wurden quantitativ erfaßt und mit Hilfe der während des Expositionszeitraums protokollierten Klima- und Luftschadstoffdaten in Beziehung gesetzt zu den am jeweiligen Standort herrschenden Umweltbedingungen. Die Zusammenhänge zwischen der Immission beziehungsweise Deposition von Luftschadstoffen, klimatischen Faktoren und den an den Materialien aufgetretenen Korrosionsschäden ließen sich durch materialspezifische Dosis-Wirkungsbeziehungen quantitativ beschreiben (UN ECE 1998).

An der Erarbeitung von Dosis-Wirkungsfunktionen haben sich das Swedish Corrosion Institute (vereinheitlichte ICP-Funktionen), das Umweltbundesamt (UBA-Funktionen) und das Bayerische Landesamt für Denkmalpflege (BLfD-Funktionen) beteiligt. Das Bayerische Landesamt für Denkmalpflege stellt Dosis-Wirkungsfunktionen für Kupfer und Bronze zur Verfügung. Das Umweltbundesamt beteiligt sich mit Dosis-Wirkungsfunktionen für verwitterungsbeständigen Stahl, Zink, Bronze, Kupfer, Mansfield Sandstein und Portland Kalkstein. Vereinheitlichte ICP-Funktionen liegen für insgesamt zwölf Materialien vor: Verwitterungsbeständigen Stahl, Zink, Aluminium, Kupfer, Bronze, Portland Kalkstein, Mansfield Sandstein, Glas, für die elektrischen Kontaktmaterialien Nickel und Zink, sowie für die Korrosionsschutzanstriche Alkyd-Melamin auf verzinktem Stahlblech und Silizium-Alkyd auf Stahlplatten.

Insgesamt stehen somit 20 Dosis-Wirkungsfunktionen für zwölf verschiedene Materialien zur Verfügung. Für einzelne Materialien können bis zu drei verschiedene, weitgehend unabhängig voneinander entwickelte Funktionen verwendet werden. Hierzu wird ein Vergleich der mit unterschiedlichen Dosis-Wirkungsfunktionen erhaltenen Kartierungsergebnissen angestellt.

Mit den Dosis-Wirkungsfunktionen lassen sich aktuelle Korrosionsraten berechnen. Aktuelle Korrosionsraten kennzeichnen das Ausmaß der Korrosionsschäden unter aktuellen Klima- und Luftschadstoffbedingungen. Um aktuelle Klima- und Luftschadstoff-Bedingungen beschreiben zu können, werden aus den Klima- und Luftschadstoffdaten der Jahre 1993, 1994 und 1995 jeweils die Mittelwerte der Periode 1993-1995 gebildet und diese als Input für die Funktionen verwendet. In die Berechnungen gehen folgende Klima- und Schadstoffparameter mit ein, wobei nicht jede Funktion auf sämtliche Input-Parameter zurückgreift:

Klimatische Parameter:

- Relative Feuchte in %
- mittlere jährliche Niederschlagssumme in mm
- Jahresmitteltemperatur in °C

Schadstoffparameter

- Schwefeldioxid-Konzentration in µg/m³
- Ozon-Konzentration in µg/m³
- Chlorid-Konzentration im Niederschlag (wet only) in mg/l
- Protonenkonzentration im Niederschlag (wet only) in g/l (bzw. mg/l)

Die Daten zu den Klimaparametern wurden beim Deutschen Wetterdienst in Form digitaler Karten akquiriert. Unter Einbindung der Daten in ARC/INFO werden Karten der mittleren Luftfeuchtigkeit, der mittleren Niederschlagsmenge und der Jahresmitteltemperatur für die Periode 1993 bis 1995 erstellt. Die Daten zu den Schadstoffparametern wurden im Zuge einer aufwendigen Recherche bei den Umweltbehörden der Länder, den Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalten, beim Umweltbundesamt und anderen Forschungseinrichtungen akquiriert. Um ausgehend von den in Form von Punktdaten vorliegenden Informationen zu den Schadstoffparametern zu flächenhaften Darstellungen zu gelangen, müssen räumliche Interpolationen durchgeführt werden. Sämtliche Interpolationen werden unter Anwendung des Kriging-Verfahrens unter ARC/INFO ausgeführt.

Alle mit den UBA- und BLfD-Funktionen berechneten aktuellen Korrosionsraten werden in der Einheit jährlicher Massenverlust in g/m² angegeben. Die ICP-Funktionen für verwitterungsbeständigen Stahl, Zink, Aluminium, Kupfer und Bronze berechnen ebenfalls aktuelle Korrosionsraten in der Einheit jährlicher Massenverlust in g/m². Die Korrosionsraten von Mansfield Sandstein (ICP) und Portland Kalkstein (ICP) werden als Oberflächenrückweichung in µm pro Jahr angegeben. Der Grad der Schädigung der Anstrichsysteme Alkyd-Melamin auf verzinktem Stahlblech (ICP) und Siliziumalkyd auf Stahlplatten (ICP) wird anhand von Standards der American Society for Testing and Materials (ASTM) bewertet. Für die elektrischen Kontaktmaterialien Nickel (ICP) und Zinn (ICP) dient die Gewichtszunahme, gemessen in µg/cm², als Maß für das Ausmaß der Schädigung. Der Grad der Schädigung von Glas (ICP) wird anhand der Tiefe der ausgelaugten oberflächennahen Schicht quantifiziert. Die jährliche Korrosionsrate wird in der Einheit Nanometer (nm) angegeben.

Der Vergleich der Kartierungsergebnisse für die Materialien, für die mehrere Dosis-Wirkungsfunktionen zur Verfügung stehen, belegt, unabhängig von der Wahl der Dosis-Wirkungsfunktion, große Übereinstimmungen in den Kartierungsergebnissen, sowohl bezüglich der Höhe der ermittelten Werte als auch hinsichtlich der räumlichen Verteilung von Gebieten mit hohen bzw. niedrigen aktuellen Korrosionsraten. Unterschiede zwischen den Kartierungsergebnissen resultieren im wesentlichen aus der Berücksichtigung unterschiedlicher Inputparameter. Die Wirkung unterschiedlich starker Gewichtung einzelner Klima- oder Luftschadstoffparameter bei Verwendung gleicher Inputparameter ist von nachgeordneter Bedeutung. Die Auswirkung auf das Kartierungsergebnis bleibt relativ gering.

Die Kartierungsergebnisse aktueller Korrosionsraten spiegeln die während des Expositionsversuchs erkannten Abhängigkeiten zwischen Klima- und Luftschadstoffparametern sowie der Korrosion der jeweiligen Materialien wider. Für zehn der zwölf Materialien kann aus den Ergebnissen der Kartierungsarbeiten auf eine starke Abhängigkeit des Korrosionsverhaltens von der SO_2-Immission im jeweiligen Raum geschlossen werden. Gebiete hoher aktueller Korrosionsraten stimmen weitgehend mit den Gebieten hoher SO_2-Immission überein. Insbesondere der Raum Halle-Dresden-Leipzig, ein Gebiet mit großflächig hoher SO_2-Immission, zeichnet sich bei elf der zwölf Materialien durch sehr hohe aktuelle Korrosionsraten aus. Lediglich bei Zinn spielt die SO_2-Immission eine untergeordnete Rolle. Neben dem Raum Halle-Dresden-Leipzig zeichnen sich das Ruhrgebiet und der Raum Saarbrücken häufig durch relativ hohe aktuelle Korrosionsraten aus. Auch dies sind Gebiete, die durch eine hohe SO_2-Immission gekennzeichnet sind.

Auch der Einfluß der Chlorid-Konzentration im Niederschlag auf die aktuellen Korrosionsraten verschiedener Materialien spiegelt sich in charakteristischen räumlichen Mustern der Verteilung von Gebieten mit hoher aktueller Korrosionsrate wider. Hohe aktuelle Korrosionsraten in der Küstenregion der Nordsee, in schwächerem Maße auch der Ostsee, gehen auf die in Küstennähe erhöhte Chloridfracht des Niederschlags zurück. Insbesondere bei den mit den UBA-Funktionen ermittelten Kartierungsergebnissen wird die räumliche Wirkung der Einbeziehung des Schadstoffparameters Chlorid deutlich. Die vereinheitlichten ICP-Funktionen berücksichtigen die Chloridfracht des Niederschlags lediglich für die Berechnung der aktuellen Korrosionsraten des Materials Aluminium. Auch hier ist der Einfluß des Schadstoffparameters Chlorid am Auftreten hoher aktueller Korrosionsraten im Küstengebiet der Nordsee deutlich zu erkennen.

Der Einfluß des Schadstoffparameters Ozon sowie der Protonenfracht läßt sich anhand der Karten aktueller Korrosionsraten selten an direkten Auswirkungen auf die räumliche Verteilung von Gebieten mit hohen bzw. niedrigen aktuellen Korrosionsraten festmachen. Der Einfluß dieser Parameter innerhalb der Dosis-Wirkungsfunktionen ist entweder relativ gering und wird deshalb von der Wirkung anderer Faktoren überlagert, oder die räumliche Wirkung kommt eher flächig zum Tragen. Die BLfD-Funktion für Kupfer mißt der Ozon-Immission verhältnismäßig große Bedeutung bei, was bei diesem echenweg zum Auftreten hoher aktueller Korrosionsraten in den sich durch hohe Ozon-Konzentrationen auszeichnenden Höhenlagen des Schwarzwaldes, des Bayerischen Waldes, sowie des Harzes führt.

Verschiedentlich orientiert sich die räumliche Verteilung von Gebieten mit hohen bzw. niedrigen aktuellen Korrosionsraten auch stärker an den räumlichen Mustern klimatischer Faktoren, so zum Beispiel bei Zinn (Temperatur) oder Alkyd-Melamin auf verzinktem Stahlblech (Niederschlag, Temperatur).

Die mit den UBA- und BLfD-Funktionen erzielten Kartierungsergebnisse sowie erste Resultate der mit den vereinheitlichten ICP-Funktionen durchgeführten Kartierungsarbeiten gingen in die Beratungen auf dem UN ECE Workshop on Quantification of Effects of Air Pollutants on Materials vom 25.-27. Mai 1998 in Berlin mit ein. Hier wurde beschlossen für alle weiterführenden Arbeiten die vereinheitlichten ICP-Funktionen zu verwenden. Die Kartierung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten erfolgt daher ausschließlich anhand der mit den vereinheitlichten ICP-Funktionen berechneten aktuellen Korrosionsraten.

Akzeptable Korrosionsraten kennzeichnen die Grenze zwischen der gerade noch akzeptablen und der nicht mehr zu tolerierenden Schädigung eines Materials durch Luftverunreinigungen. Sie leiten sich als Vielfache der natürlichen Hintergrundkorrosionsraten ebenso wie die Dosis-Wirkungsfunktionen aus Ergebnissen des achtjährigen Expositionsversuchs ab. Innerhalb des UN ECE ICP on Materials wurde beschlossen, für jedes Material das unterste 10. Perzentil (K_{10}) aller im Zuge des Materialexpositionsprogramms beobachteten Korrosionsraten als Hintergrundkorrosionsrate festzulegen. Die akzeptablen Korrosionsraten (K_{acc}) lassen sich gemäß $K_{acc} = K_{10} \cdot n$ berechnen. Für den Faktor „n“ wurden Werte zwischen 1,5 und 3 gewählt.

Die Berechnung und Kartierung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten erfolgt durch den Vergleich aktueller und akzeptabler Korrosionsraten. Die Überschreitung kennzeichnet das quantitativ nicht mehr tolerierbare Ausmaß von Korroion an Bau- und Kunstwerken. Die Kartierung weist diejenigen Gebiete aus, in welchen die aktuellen die akzeptablen Korrosionsraten überschreiten.

Da lediglich für sieben der zwölf Materialien Informationen zu den Hintergrundkorrosionsraten zur Verfügung stehen, erfolgt die Berechnung und Kartierung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten nur für die Materialien verwitterungsbeständiger Stahl, Zink, Aluminium, Kupfer, Bronze, Portland Kalkstein und Mansfield Sandstein. Ausgehend von den Hintergrundkorrosionsraten werden drei verschiedene akzeptable Korrosionsraten (K_{acc}) berechnet. Dazu werden die Faktoren n = 1,5, n = 2 und n = 3 verwendet ($K_{acc} = n * K_{10}$).

Die mit den Faktoren n = 1,5, n = 2 bzw n = 3 berechneten akzeptablen Korrosionsraten legen unterschiedliche strenge Maßstäbe der Bewertung aktueller Korrosionsraten an. Bei Verwendung des strengsten Kriteriums (n = 1,5) resultieren niedrige akzeptable Korrosionsraten und in der Folge stärkere und großflächigere Überschreitungen der akzeptablen Korrosionsraten. Wohingegen die mit dem Faktor n = 3 berechneten akzeptablen Korrosionsraten auch höhere Werte aktueller Korrosionsraten zulassen. Die Kartierungsergebnisse zeigen, daß bei Anwendung der akzeptablen Korrosionsraten $K_{acc}3$ die aktuellen Korrosionsraten großflächig unter der als akzeptabel definierten Marke liegen. Lediglich in Gebieten maximaler SO_2-Immission treten Überschreitungen der akzeptablen Korrosionsraten auf. Für einige Materialien sind bei Verwendung der akzeptablen Korrosionsrate $K_{acc}3$ bundesweit keine Überschreitungen zu verzeichnen. Völlig anders zeigen sich die Ergebnisse der Kartierung mit dem strengsten Kriterium ($K_{acc}1{,}5$). Hier treten bei allen Materialien großflächig Überschreitungen der akzeptablen Korrosionsraten auf. Die aktuellen Korrosionsraten liegen bei einigen Materialien regional um weit mehr als 100 % über den als akzeptabel betrachteten Werten. Gebiete mit Unterschreitung der akzeptablen Korrosionsraten sind dennoch bei allen Materialien vorhanden. Unterschreitungen der akzeptablen Korrosionsraten konzentrieren sich zumeist in Baden-Württemberg und Bayern. In der Regel zeichnen sich die Gebiete hoher SO_2-Immission durch starke Überschreitungen akzeptabler Korrosionsraten aus. Der stark korrosiven Wirkung des SO_2 wird somit Rechnung getragen.

Ein weiteres Anwendungsgebiet der im Rahmen des ICP-Materials-Projekts erarbeiteten Dosis-Wirkungsbeziehungen neben der Kartierung akzeptabler Toleranzgrenzwerte für Materialien ist die ökonomische Abschätzung von Materialschäden. Die Schäden werden mittels des sogenannten *Schadensfunktions-Ansatzes* ermittelt. Die Dosis-Wirkungsbeziehung allein stellt dabei aber noch keine Schadensfunktion dar. Erst durch die Kombination der Dosis-Wirkungsbeziehung mit einem Instandsetzungskriterium ergibt sich eine *physische Schadensfunktion*. Die physische Schadensfunktion zusammen mit Daten zum Materialbestand und zu den flächenspezifischen Instandsetzungskosten ist die *ökonomische Schadensfunktion*. Die Vorteile einer ökonomischen Abschätzung mittels einer Schadensfunktion sind, daß der Ansatz auf ein größeres Untersuchungsgebiet anwendbar und die Ergebnisse fortschreibbar sind. Hier beschränkte sich die Abschätzung aufgrund der Datenlage auf Wohngebäude in Deutschland.

Schäden an Kulturgütern können zur Zeit nicht abgeschätzt werden, da der Bestand nicht erfaßt ist und die flächenspezifischen Instandsetzungskosten nicht benannt werden können. Es ist auch fraglich, ob die zur Verfügung stehenden Dosis-Wirkungsbeziehungen die eintretenden Schäden adäquat abbilden können. Restaurationskosten können nur sehr unvollständig zusammengestellt werden und, wenn doch erfaßt, nicht den Luftverunreinigungen zugeordnet werden, da die tatsächlichen Ausgaben im wesentlichen von anderen Faktoren bestimmt werden. Der „kulturelle Wertverlust„ ist nicht quantitativ faßbar, da es keine von Denkmalpflegern wie von „Normalbürgern“ allgemein akzeptierte Definition des kulturellen Werts gibt. Wenn sich der kulturelle Wert über die Originalität und Authentizität eines Sachguts definiert, ist jeder Schaden irreversibel, da durch Schädigung *und* Restauration eines Kulturguts dessen Originalität und Authentizität beeinträchtigt werden.

Ein wesentlicher Teil der Entwicklung der Methode war die Erstellung eines Gebäudekatasters und eines Materialkatasters für das Jahr 1995, das ebenfalls fortgeschrieben werden kann. Diese Kataster könnten auch bei einer Level II-Analyse der Toleranzgrenzwerte von Materialien nützlich sein. Die Herleitung der Katasters erfolgte mittels der Gebäudetypenmethode. Im ersten Schritt wurde ein Gebäudekataster differenziert nach Gebäudetypen aus den Gebäudezählungen von 1987 und 1995 und den zwischenzeitlichen Fortschreibungen erstellt. Im nächsten Schritt wurden dieses Gebäudekataster mit repräsentativen Erhebungen zu den Materialoberflächen an den spezifizierten Gebäudetypen kombiniert.

Mit dem Ansatz werden für den Bezugszeitraum 1993-1995 für Wohngebäude in Deutschland jährliche Schadenskosten von 430 Mio. DM quantifiziert. Bezogen auf die Gesamtbevölkerung in Deutschland von ca. 80 Mio. Menschen ergeben sich daraus jährliche Instandsetzungskosten von ca. 5 DM pro Kopf. Zu den quantifizierten Schadenskosten tragen die galvanisierten Stahlflächen am stärksten bei. In den meisten Gebieten Deutschlands werden jährliche Schadenskosten von bis zu 5000 DM pro km^2 Kreisfläche quantifiziert. Die höchsten Schäden pro km^2 ergeben sich für das Ruhrgebiet (bis zu 46000 DM/km^2). Andere Verdichtungsräume mit relativ hohen maximalen Kosten (14000–23000 DM/km^2) sind der Raum um Köln-Bonn, Stuttgart, der Großraum Frankfurt, Berlin, Bremen und Kassel.

Einige Schadensfälle können nicht quantifiziert werden, weil Modelle bzw. Daten nicht zur Verfügung stehen. Dementsprechend gibt es in einigen Punkten Forschungsbedarf, um die ökonomische Abschätzung von Materialschäden zu verbessern:

- Es fehlen Dosis-Wirkungsbeziehungen für Anstriche und Beton, die ökonomisch von großer Bedeutung sind.
- Weiterhin stehen im Moment keine quantitativen Wirkungsbeziehungen zur Abschätzung des Beitrags von Partikeln zur Verschmutzung von Hausfassaden u.ä. zur Verfügung.
- Das Materialkataster beruht auf der Erhebung an Gebäuden in Dortmund und Köln. Dies ist problematisch, da klimatische, ökonomische und kulturelle Faktoren den Baustil und die Wahl von Materialien für Wohngebäude entscheidend beeinflussen. Bestandsaufnahmen von repräsentativen Gebäuden in verschiedenen Teilen Deutschlands würden daher die Belastbarkeit der Ergebnisse verbessern.
- Es gibt bisher praktisch keine empirischen Daten dazu, welche Faktoren die Entscheidung privater Eigentümer beeinflussen, wann sie ihre Häuser instandsetzen lassen.
- In dem Wohngebäudekataster sind auch Häuser enthalten, denen ein besonderer kultureller Wert zugeschrieben wird. Die Schäden durch Luftbelastung an solchen Gebäuden sind in vielen Fällen durch die Instandsetzungskosten nicht abgedeckt. Gerade auf dem Gebiet der ökonomischen Abschätzung des kulturellen Wertverlusts durch Luftverschmutzung wurden bisher nur sehr vereinzelt Studien durchgeführt.

Das Forschungsvorhaben „Kartierung von Toleranzgrenzwerten der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien in Deutschland“ konnte nicht im ursprünglich geplanten Umfang bearbeitet werden. Die Berechnung und Kartierung derjenigen Schadstoffkonzentrationen, beziehungsweise –depositionen, bei deren Erreichen die akzeptablen Korrosionsraten gerade noch unterschritten werden (acceptable levels), konnte nicht durchgeführt werden, da die dafür benötigten Formeln zum Zeitpunkt des Projektendes noch nicht vorlagen. Dennoch können die Ergebnisse der Kartierungsarbeiten zu den aktuellen Korrosionsraten und der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten in Verbindung mit der ökonomischen Abschätzung der durch Luftschadstoffe hervorgerufenen Materialschäden erste Anhaltspunkte liefern für die künftige Festlegung von Toleranzgrenzwerten der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien in Deutschland.

9 Summary

In 1987 within „ICP Materials“ an eight year material exposure programme was started. The target was to elaborate the scientific basis of the relationships between air pollutants and climate on the one hand and deterioration of structural materials on the other. At 39 test sites in Europe and Northern America samples of the materials weathering steel, zinc, aluminium, copper, cast bronze, Portland Limestone, Mansfield Sandstone, coil coated steel with alkyd melamin, steel panels with silicon alkyd, nickel, tin and glass were exposed to the atmosphere and subsequently to air pollutants. The test sites were located in the neighbourhood of meteorological measurement sites. Therefore, climatic data were available for the whole test period and every test site. After a 1-, 2-, 4- and 8-year period of exposure samples of the materials were examined, in order to determine the consequences of the corrosion attack.

The results of the material exposure programme were used to derive dose-response-functions. They describe the relationship between climate and air pollutants on the one hand and the deterioration of structural material on the other quantitatively. The application of these dose-response-functions is one of the main aspects of this study.

Several institutions participated in the analysis of the results of the eight year material exposure programme: The Swedish Corrosion Institute (Stockholm) provided dose-response-functions (ICP-functions) for the materials weathering steel, zinc, aluminium, copper, cast bronze, Portland Limestone, Mansfield Sandstone, coil coated steel with alkyd melamin, steel panels with silicon alkyd, nickel, tin and glass. For the materials weathering steel, copper, cast bronze, zinc, Portland Limestone and Mansfield Sandstone dose-response-functions were elaborated by the Federal Environmental Agency (UBA-functions). In addition, the Bavarian States Conservation Office (BLfD-functions) provided dose-response-functions for copper and cast bronze. Therefore, for several materials two or three different types of dose-response-functions were available to calculate and map actual corrosion rates. A comparison was made between the mapping results of the different types of dose-response-functions.

By using the dose-response-functions actual corrosion rates were calculated and mapped. Actual corrosion rates describe the extent of corrosion processes under „actual atmospheric conditions“. To describe „actual atmospheric conditions“ mean values of climatic and air pollutant data of the period 1993 to 1995 were used.

The dose-response-functions require the following input parameters:

- climatic parameters:
  relative humidity in %
  mean annual amount of precipitation in mm
  mean annual temperature in°C

- air pollutant parameters:
  concentration of sulphur dioxide in µm/m³
  concentration of ozone in µm/m³
  concentration of chloride in precipitation wet only) in mg/l
  concentration of protons in precipitation (wet only) in g/l resp. mg/l

The climatic data were acquired at the German Weather Agency (DWD) as digital maps. Data about the concentration of ozone and sulphur dioxide were collected out of the data

bank of the Federal Environmental Agency in Berlin. Data about the concentration of chloride and protons in precipitation were provided from the States Environmental Agencies, Forest Research Centers, the Federal Environmental Agency and others. To get grids out of the point data sets of the air pollutant measurement sites Kriging interpolation was applied. All calculations were done under ARC/INFO-Geographical Information System.

The UBA- and BLfD-functions calculate actual corrosion rates in the unit yearly mass loss in g/m². The ICP-functions calculate actual corrosion rates of weathering steel, zinc, aluminium, copper and bronze as yearly mass loss in g/m². Damage to stone materials is calculated as surface recession in µm. Standards of the American Society of Testing and Materials (ASTM) are used to describe corrosion damage to paint coatings. Electric contact materials are normally exposed to corrosion in sheltered positions. Therefore the yearly weight increase (µg/cm²) can be used as an indicator of corrosion damages. The actual corrosion rates of glass materials are indicated by the depth of the leached layer in nm.

Mapping actual corrosion rates with different types of dose-response-functions lead to results, which correspond well in magnitude as well as in spatial patterns. Nevertheless there are some differences. They mainly come from using different input parameters. For instance, the dose-response-function of the material bronze, elaborated by the Federal Environmental Agency in Berlin (UBA-function), considers the concentration of chloride in precipitation. Therefore, the mapping results indicate high actual corrosion rates around the coast line of the North Sea. The ICP-function of bronze does not consider the concentration of chloride in precipitation. Consequently, the mapping results do not show high actual corrosion rates near the coast line of the North Sea. Some smaller differences in mapping results come from differences in the importance, which the formulas put to the several input parameters within the formula.

For most of the materials SO_2 is the main corrosive agent in the air. Consequently, high actual corrosion rates appear mainly in the regions of highest concentration of SO_2. This is, first of all, the area Halle-Leipzig-Dresden. But also in the Ruhrgebiet and some smaller areas around industrial cities high actual corrosion rates are indicated by the mapping results. In the south of Germany there are large regions with low actual corrosion rates of many materials. But many material specific differences in mapping results have to be considered. For instance, climatic aspects are important for corrosion processes concerning alkyd melamin paint coatings on coil coated steel.

The mapping results of UBA- and BLfD-functions as well as first mapping results of the ICP-functions were discussed on the UN ECE Workshop on the Quantification of Effects of Air Pollutants on Materials, may 25th -27th 1998 in Berlin. At the end of the meeting it was decided to use the ICP-functions for future works.

Another result of the eight year material exposure programme are values concerning the background corrosion rates of the materials. Background corrosion rates mark the natural share of corrosion processes. This natural share has to be considered, if Acceptable Levels/Loads for the effect of air pollutants on materials will be calculated and mapped. Within ICP Materials it was decided to use the lower 10-percentile of all corrosion rates observed during the material exposure programme as background corrosion rate (K_{10}).

By using the data about the background corrosion rates acceptable corrosion rates were calculated. Acceptable corrosion rates (K_{acc}) are multiples of the background corrosion rates ($K_{acc} = n \cdot K_{10}$). They mark the dimension of corrosion processes, which is decided to be acceptable in consideration of technical and economic facts. Acceptable corrosion rates were

calculated for the materials weathering steel, zinc, aluminium, copper, cast bronze, Portland Limestone and Mansfield Sandstone. For the materials glass, nickel, tin, coil coated steel with alkyd melamin and steel panels with silicon alkyd no acceptable corrosion rates could be calculated, because essential information about the background corrosion rates of these materials were not available. By choosing different values for „n“ ($K_{acc} = n \cdot K_{10}$) three different acceptable corrosion rates were calculated (n = 1,5 n = 2 n = 3). The three different acceptable corrosion rates apply different standards to the assessment of corrosion damages on the materials. Low values for „n“ produce strict acceptable corrosion rates and large areas with exceedances of acceptable corrosion rates.

The exceedances of the acceptable corrosion rates can be calculated by comparing the actual corrosion rates with the acceptable corrosion rates. These calculations have been done with the unified ICP-dose-response-functions only. The exceedance maps show the regions, where the actual corrosion rates exceed the acceptable corrosion rates and, therefore the damages to buildings and historic and cultural monuments are unacceptably high. Even if n = 3 is used to calculate acceptable corrosion rates, there are exceedances of the acceptable corrosion rates of some materials on to 55 %. If n = 1.5 is used to calculate acceptable corrosion rates, there are high exceedances of the acceptable corrosion rates of all materials in large parts of Germany. For instance, the acceptable corrosion rate of Portland Limestone is exceeded on to about 200 %.

One of the main targets of the study could not be fulfilled. The calculation and mapping of Acceptable Pollution Levels was not possible, because essential functions for these calculations were not available till the end of the project period.

Besides for mapping of acceptable levels the dose-response functions derived in the ICP Materials project can be used for an economic assessment of material damages. The damages are calculated using the so-called *damage function approach*. The dose-response function by itself, however, is not yet a damage function. Only combined with a maintenance criteria the dose-response-function is a *physical damage function.* The physical damage function linked to a material inventory and specific maintenance costs constitutes the *economic damage function*. The advantages of an economic assessment using a damage function approach are that it can be applied to larger areas and that the effort for an update is limited. Due to data availability the assessment is limited to residential buildings in Germany in this study.

The loss of cultural value cannot be assessed at the moment as cultural objects are not inventoried and as there are no uniform specific maintenance costs. It is doubtful that the physical damages could be assessed with the available dose-response functions. Restoration costs can only incompletely be compiled. If put together, it is not possible to clearly attribute the restoration costs to air pollution as the actual restoration expenditures depend mostly on other factors. ‘Loss of cultural value’ cannot be quantified as there is no general definition of cultural value, which is accepted by conservators and lay persons. If cultural value is a function of the originality and authenticity of an object, any damage is irreversible, as damage *and* restoration of an cultural object are detrimental to its originality and authenticity.

An important part of the work in this study was the derivation of a building and material inventory for 1995, which can also easily be updated. Furthermore, the material inventory could be useful for a level II analysis of the acceptable pollution levels for materials. The inventory was derived based on the ‘building type’ approach. In a first step a building inventory that is differentiated according to building types is calculated based on the building censuses of 1987 and 1995 and updates of the Statistisches Bundesamt. In the next step the

building inventory is combined with representative surveys on the outdoor surfaces of the specified building types.

With the approach annual damage costs of 430 million DEM are quantified for residential buildings in Germany in the time of 1993 to 1995. These results correspond to annual maintenance costs of about 5 DEM per capita based on the total population in Germany of about 80 million. The galvanised steel surfaces contribute the most to the quantified damage costs. In most regions in Germany annual damages of up to 5000 DEM per km^2 total area are quantified. The highest damages occur in the Ruhrgebiet (up to 46000 DEM/km^2). Other agglomeration areas with relatively high costs (14000–23000 DEM/km^2) are the region around Cologne-Bonn, Stuttgart, the region around Frankfurt, Berlin, Bremen and Kassel.

However, some important damages cannot be quantified as dose-response functions and data are not available. Thus further research on the following points is needed to improve the economic assessment of material damages:

- There are no dose-response functions for the economically important materials paint and concrete available.
- Furthermore, there are no quantitative relationships for the assessment of soiling of facades etc. due to particulates available.
- The material inventory is based on surveys of buildings in Dortmund and Cologne. This is problematic as climatic, economic and cultural factors significantly influence the style and choice of materials used for residential buildings. Surveys of representative buildings in various parts of Germany would improve the reliability of the material inventory.
- There are practically no empirical data available on what factors influence the decision of house owners to initiate maintenance measures.

The inventory of residential buildings also contains buildings that are seen to be of cultural value. The damages of air pollution to such buildings are in most cases not restricted to maintenance costs. Particularly in the field of economic assessment of cultural value loss due to air pollution there have been only few studies carried out so far.

Despite the fact that the calculation and mapping of acceptable pollution levels was not yet possible, the study „Mapping Acceptable Levels/Loads for effects of air pollutants on materials in Germany“ lead to important results. Actual corrosion rates of twelve materials could be calculated and mapped. A comparison of the mapping results of different types of dose-response-functions was carried out. The exceedance of acceptable corrosion rates of seven materials could be calculated and mapped. The influence of using different acceptable corrosion rates to the mapping results has been estimated. Finally, one of the main aspects of this study was carried out. The economic assessment of material damages, caused by corrosion processes.

Literatur

APSIMON, H.M., COWELL, D. (1997): Estimating the reduced damage to buildings in Europe due to implementation of the second sulphur protocol. In: Kucera, V., Pearce, D., Brodin, Y.-W. (Hrsg.): Economic Evaluation of Air Pollution Damage to Materials. Proceedings of the UN ECE Workshop on Economic Evaluation of Air Pollution Abatement and Damage to Buildings Including Cultural Heritage. Stockholm, 23.-25. January 1996, Report No. 4761, Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm, 1997, S. 211-216

ANSHELM, F., GAUGER, TH., KÖBLE, R. & MAYERHOFER, P. (1998): Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben 10807034 „Kartierung von Toleranzgrenzwerten der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien in Deutschland". Stuttgart, 60 S..

BACH, W., GEORGII, H. & STEUBING, L. (1995): Schadstoffbelastung und Schutz der Erdatmosphäre. Umweltschutz – Grundlagen und Praxis, Bd. 7, 188 S..

BACKES, M. (1987): Historische Originalität und materielle Substanz - Denkmalpflege zwischen Bewahrung und Verlust, Konservierung und Verfälschung. Deutsche Kunst und Denkmalpflege 45, 27-36

CORDARO, M. (1997): Risk map of cultural heritage. In: Kucera, V., Pearce, D., Brodin, Y.-W. (Hrsg.): Economic Evaluation of Air Pollution Damage to Materials. Proceedings of the UN ECE Workshop on Economic Evaluation of Air Pollution Abatement and Damage to Buildings Including Cultural Heritage. Stockholm, 23.-25. January 1996, Report No. 4761, Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm, S. 99-109

DEUTSCHES NATIONALKOMITEE FÜR DENKMALSCHUTZ (DND) (1985): Steinzerfall. Bonn : Deutsches Nationalkomitee für Denkmalschutz.

EBEL, W., EICKE, W., FEIST, W. *ET AL (1990)*: Energiesparpotentiale im Gebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt.

FEENSTRA, J.F. (1984): Cultural Property and Air Pollution Damage to Monuments, Artobjects, Archives and Buildings due to Air Pollution. Report for Ministry of Housing, Physical Planning and Environment,Amsterdam : Instituut voor Milieuvraagstukken.

FREY, R.L., GYSIN, CH. H., LEU, R.E., SCHMASSMANN, N. (1991): Energie, Umweltschäden und Umweltschutz in der Schweiz. WWZ-Beiträge Band 3, 2. Aufl. (1. Aufl., 1985), Chur : Verlag Rüegger.

GLOMSRØD, S., GODAL, O., HENRIKSEN, J.F., *ET AL (1997)*: Corrosion costs in Norway. In: Kucera, V., Pearce, D., Brodin, Y.-W. (Hrsg.): Economic Evaluation of Air Pollution Damage to Materials. Proceedings of the UN ECE Workshop on Economic Evaluation of Air Pollution Abatement and Damage to Buildings Including Cultural Heritage. Stockholm, 23.-25. January 1996, Report No. 4761, Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm, S. 206-210

GROSCLAUDE, P., SOGUEL, N. C. (1994): Valuing Damage to Historic Buildings Using a Contingent Market: A Case Study of Road Traffic Externalities. Journal of Environmental Planning and Management 37 279-287

GRUNSKY, E. (1991): Kunstgeschichte und die Wertung von Denkmälern. Deutsche Kunst und Denkmalpflege 49/2, 107-118

GÜLEC, T., KOLMETZ, S., ROUVEL, L . (1994a): Nutzenergiebedarf für Raumwärme in der Bundesrepublik Deutschland (alte und neue Bundesländer, 1989). IKARUS-Teilprojekt 5 „Haushalte und Kleinverbraucher“, Bd. 5-11, Forschungszentrum Jülich, Jülich.

GÜLEC, T., KOLMETZ, S., ROUVEL, L . (1994b): Energieeinsparungspotential im Gebäudebestand durch Maßnahmen an der Gebäudehülle. IKARUS-Teilprojekt 5 „Haushalte und Kleinverbraucher“, Bd. 5-22, Forschungszentrum Jülich, Jülich.

HAYNIE, F.H. (1986): Atmospheric Acid Deposition Damage due to Paints, US-EPA Report EPA/600/M-85/019.

HEINRICH, U. (1992): Zur Methodik der räumlichen Interpolation mit geostatistischen Verfahren: Untersuchungen zur Validität flächenhafter Schätzungen diskreter Messungen. Diss. niv. Kiel, 124 S..

HEINZ, I. (1983): Volkswirtschaftliche Kosten durch Luftverunreinigungen. INFU-Werkstattreihe Heft 4, 2. Aufl. (1. Aufl. 1980), Dortmund : Verkehrs- und Wirtschafts-Verlag Borgmann.

HOOS, D., JANSEN, R., KEHL, J., *ET AL (1987)*: Gebäudeschäden durch Luftverunreinigungen - Entwurf eines Erhebungsmodelles und Zusammenfassung von Projektergebnissen. Bericht an ECOTEC-Research and Consulting Ltd., Institut für Umweltschutz (INFU), Dortmund.

ISECKE, B., WELTSCHEV, M., HEINZ, I. (1990): Volkswirtschaftliche Verluste durch umweltverschmutzungsbedingte Materialschäden in der Bundesrepublik Deutschland. Berlin : Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung.

ISO/DIS 8407 (1991): Corrosion of metals and alloys – Removal of corrosion products from corrosion test specimens. 7 S..

KÖBLE, R., SMIATEK, G. & GAUGER, TH . (1997): Endbericht zum Forschungsvorhaben 106 01 061 „Kartierung kritischer Belastungskonzentrationen und –raten für empfindliche Ökosysteme in der Bundesrepublik Deutschland und anderen ECE-Ländern: Teil 2: Critical Levels“ .Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin, 75 S..

KÖNEKE, M., KÖNEKE, R. (1988): Schäden am Haus - Ursachen, Beseitigung, Kosten. 2. überarb. Aufl., R. Müller Verlag, Köln.

KUCERA, V., HENRIKSEN, J., KNOTKOVA, D., SJÖSTRÖM, CH . (1993): Model for Calculations of Corrosion Cost Caused by Air Pollution and Its Application in Three Cities. Report No. 084, Swedish Corrosion Institute, Roslagsvägen.

KUCERA, V., TIDBLAD, J., HENRIKSEN, J. ET AL .(1995): Statistical analysis of 4 year materials exposure and acceptable deterioration and pollution levels - UN-ECE ICP on Effects on Materials, Including Historic and Cultural Monumenst. Report No. 18, Swedish Corrosion Institute, Stockholm.

KUCERA, V., PEARCE, D., BRODIN, Y.-W. (1997): Report by Chairmen of the Workshop. In: Kucera, V., Pearce, D., Brodin, Y.-W. (Hrsg.): Economic Evaluation of Air Pollution Damage to Materials. Proceedings of the UN ECE Workshop on Economic Evaluation of Air Pollution Abatement and Damage to Buildings Including Cultural Heritage. Stock-

holm, 23.-25. January 1996, Report No. 4761, Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm, S. 6-10

KUIK, O., JANSEN, H. (1992): On the valuation of air pollution damage to buildings and monuments and on recreation in forests and parks. Position paper, EU-Project „External Costs of Fuel Cycles“, Amsterdam : Instituut voor Milieuvraagstukken (IVM).

KUIK, O., JANSEN, H., OPSCHOOR, J. (1991): The Netherlands. In: Barde, J.-Ph., Pearce, D.W.: Valuing the Environment: six case studies. London : Earthscan Publ. Ltd., S. 106-140

LAREAU, TH.J., HORST, R.L., MANUEL, E.H., LIPFERT, F.W. (1986): Model for Economic Assessment of Acid Damage to Building Materials. Materials Degradation Caused by Acid Rain, American Chemical Society, S. 369-383

LÜBBECKE, W. (HRSG.) (1989): Denkmalinventarisation - Denkmalerfassung als Grundlage des Denkmalschutzes. 4. Jahrestagung des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, München, 2.-3. Juli 1987, Arbeitsheft 38, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München.

MAYERHOFER, P., KREWITT, W., TRUKENMÜLLER, A., FRIEDRICH, R. (1997): Economic Assessment of Material Damage in the Framework of External Costs of Energy Systems. In: Kucera, V., Pearce, D., Brodin, Y.-W. (Hrsg.): Economic Evaluation of Air Pollution Damage to Materials. Proceedings of the UN ECE Workshop on Economic Evaluation of Air Pollution Abatement and Damage to Buildings Including Cultural Heritage. Stockholm, 23.-25. Januar 1996, Report No. 4761, Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm, S. 186–205

MCCARTHY, E.F., STANKUNAS, A.R., YOCOM, J.E. ET AL. (1984): Damage Cost Models for Pollution Effects on Materials. EPA-600/3-84-012, PB 84 140342MÜLLER-WESTERMEIER, G. (1995): Numerisches Verfahren zu Erstellung klimatologischer Karten.- Berichte des Deutschen Wetterdienstes 193. Offenbach, 18 S..

MURARO, G. (1974): Estimate of the Economic Damage Caused by Pollution: The Italian Experience - Comments on the ENI-ISVET Research - 1969-70. In: OECD (Hrsg.): Environmental Damage Costs. OECD, Paris.

NAGEL, H.-D.& GREGOR H.-D. [HRSG.] (1998): Ökologische Belastungsgrenzen – Critical Loads & Levels. Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik. Springer-Verlag. 320 S.NAVRUD, S., PEDERSEN, P.-E., STRAND, J. (1992): Valuing our cultural heritage. A Contigent Valuation survey. Oslo : Center for Research in Economics and Business Administration (SNF).

PASSAGLIA, E. (1986): Economic Effects of Materials Degradation. Materials Degradation Caused by Acid Rain, American Chemical Society,S. 384-396

PETERS, S.J. (1986): „Standard Data-Set“ for Use with DAS-2, A Decision Analysis Model of the SO_2 emissions control question - 6. Model and dose-response relationships for galvanized steel. Memorandum, CEGB Research in Confidence.

PONS, A.; RABL, A.; CURTISS, P.S. (1995): The Impact of Air Pollution on Buildings: an Estimation of Damage Costs in France. In: Environmental Impacts and their Costs: the Nuclear and the Fossil Fuel Cycles. Final Report of the Project *External Costs of Fuel Cycles* -

Implementation of the Accounting Framework in France, Version 2.0, Part II, Appendix C, Paris, S. C.1-C.23

ROSIN, R., GLITZ, P., BORGES, H., LORENZ, G . (1994): Gebäudetypologie und spezifischer Energiebedarf für den Wohnungsbestand in den neuen Bundesländern. IKARUS-Teilprojekt 5 „Haushalte und Kleinverbraucher", Bd. 5-06, Forschungszentrum Jülich, Jülich.

ROTH, U., HÄUBI, F., ALBRECHT, J. ET AL . (1980): Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen. Forschungsprojekt BMBau RS II 4 - 70 41 02 - 77.10 (1980), Schriftenreihe „Raumordnung", Bonn : Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau.

SCHERELIS, G. & BLÜMEL, W: D. (1988) : Geostatistik un ihre Anwendungsperspektiven in der Geoökologie am Beispiel des Kriging-Verfahrens. Karlsruher Manuskripte zur Mathematischen und Theoretischen Wirtschafts- und Sozialgeographie, Heft 92. 19 S..

SCHREIBER, H. (1982): Air Pollution Effects on Materials. In: Committee on the Challenges of Modern Society (CCMS) (Hrsg.): Impact of Air Pollutants on Materials. Number 139, Vol. I, Report of Panel 3 „Environmental Impact" of the NATO-CCMS Pilot Study on Air Pollution Control Strategies and Impact Modeling, NATO.

SHERWOOD, S.I., LIPFERT, F.W., DAUM, M.L. ET AL . (1991): Distribution of Materials Potentially at Risk from Acidic Deposition - NAPAP Report 21. In: Irving, P.M. (Hrsg.): Acidic Deposition: State of Science and Technology, Vol. III, Terrestrial, Materials, Health and Visibility Effects. Washington D.C. : The U.S. National Acid Precipitation Assessment Program.

SHORT, N.R. (1994): External Costs of Fuel Cycles - Impact on Materials. A report for Natural Environmental Research Council & Commission of the European Communities, DGXII, Aston Materials Services Ltd., Birmingham.

STANKUNAS, A.R., UNITES, D.F., MCCARTHY, E.F. (1983): Air-Pollution Damage to Man-Made Materials: Physical and Economic Estimates - Final Report. EPRI-EA-2837 Research Project 1004-1, Connecticut: TRC Environmental Consultants, Inc..

STATISTISCHES BUNDESAMT (1997) : Bestand an Wohnungen 31. Dezember 1995. Reihe 3, Fachserie 5 (Bautätigkeit und Wohnungen), Metzler-Poeschel, Stuttgart.

TRIEBSWETTER, U . (1998): Third Progress Report - Green Accounting Research project II (GARP II). ifo Institut, München.

UMWELTBUNDESAMT (HRSG.) (1986): Kosten der Umweltverschmutzung. Tagungsband zum Symposium im Bundesministerium des Innern am 12. und 13. September 1985, UBA-Berichte 7/86, Berlin : Erich Schmidt Verlag.

UMWELTBUNDESAMT (UBA) (1996): Manual on methodologies for Mapping Critical Loads/Levels and geographical areas where they are exceeded. Umweltbundesamt, Texte 71/96. Berlin. 144 S..

UMWELTBUNDESAMT (HRSG.) (1997): Daten zur Umwelt. Der Zustand der Umwelt in Deutschland. Ausgabe, 570 S..

UN-ECE (1984): Air-Borne Sulphur Pollution - Effects and Controls. New York : UN-ECE, S. 164-262

UN ECE (1992): Critical Levels of Air Pollutants for Europe. Background Papers Prepared for the UN ECE Workshop on Critical Levels in Egham, U.K. 23.-26. march 1992. Air Quality Division, Department of the Environment, London (U.K.). 209 p..

UN ECE (1998): Statistical analysis of 8 year materials exposure and acceptable deterioration and pollution levels (outline version). Stockholm, 45 S..

WULF, W. (1989): Zum Denkmalbegriff in der Öffentlichkeit - Ablehnung oder Akzeptanz? In: Lübbeke, W. (Hrsg.): Denkmalinventarisation - Denkmalerfassung als Grundlage des Denkmalschutzes. 4. Jahrestagung des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, München, 2.-3. Juli 1987, Arbeitsheft 38 des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, München, S. 31-34.

YATES, T., BUTLIN, R., MEDHURST, J. (1997): Assessing the economic benefits of reduced SO_2 concentrations for buildings in the UK. In: Kucera, V., Pearce, D., Brodin, Y.-W. (Hrsg.): Economic Evaluation of Air Pollution Damage to Materials. Proceedings of the UN ECE Workshop on Economic Evaluation of Air Pollution Abatement and Damage to Buildings Including Cultural Heritage. Stockholm, 23.-25. January 1996, Report No. 4761, Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm, S. 162-185.

YOCOM, J.E., UPHAM, J.B. (1977): Effects on Economic Materials and Structures In: Stern, A.C. (Hrsg.): Air Pollution - Vol. II, 3. Aufl., New York : Acad. Press, S. 65-116.

YOCOM, J.E., BAER, N.S., ROBINSON, E. (1986): Air Pollution Effects on Physical and Economic Systems. In: Stern, A.C. (Hrsg.): Air Pollution - Vol. VI. 3. Aufl., Orlando : Acad. Press, S. 146-246.