

Schäden an Hochbauten durch Luftverschmutzung

F 2010

F 2010

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen -BMVBW- geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

SCHÄDEN AN HOCHBAUTEN

DURCH

LUFTVERSCHMUTZUNG

- QUERSCHNITTSBERICHT ZUM STAND DER ERKENNTNISSE -

Auftragnehmer: Dr.-Ing. Rainer Oswald, Aachen
Prof. Dr.-Ing. Dietmar Rogier, Aachen/Kassel

Verfasser: Thomas Leven
Rainer Oswald

Mitarbeiter: Maja Lindt
Volker Schnapauff

Typoskript: Karola Horriar
Ute Mahler

Untersuchungsauftrag B I 5 - 80 01 84 - 13
des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau
Abschlußbericht - Aachen 1985

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Vorbemerkungen.....	4
2.	Einleitung.....	6
2.1	Die Schadstoffbelastung der Umwelt.....	9
2.2	Die Exposition der Baustoffe.....	13
2.3	Das Verwitterungsverhalten der Baustoffe.....	15
2.4	Nachbesserung.....	16
2.5	Kostenermittlung.....	17
2.6	Gliederung.....	20
3.	Schäden durch Luftverunreinigungen an anorganischen, mineralischen Baustoffen.....	21
3.1	Natursteine.....	22
3.1.1	Erscheinungsbilder.....	23
3.1.2	Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen.....	24
3.1.3	Nachbesserung.....	32
3.1.4	Zusammenfassung.....	34
3.2	Beton und Stahlbeton.....	35
3.2.1	Erscheinungsbilder.....	36
3.2.2	Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen.....	37
3.2.3	Nachbesserung.....	44
3.2.4	Zusammenfassung.....	45
3.3	Mörtel und Putze.....	46
3.3.1	Mörtel und Putze mit unbehandelten Oberflächen.....	47
3.3.1.1	Erscheinungsbilder.....	48
3.3.1.2	Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen.....	49
3.3.1.3	Nachbesserung.....	53
3.3.2	Mörtel und Putze mit behandelten Oberflächen.....	54
3.3.2.1	Erscheinungsbilder.....	54
3.3.2.2	Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen.....	55
3.3.2.3	Nachbesserung.....	57
3.3.3	Zusammenfassung.....	58
3.4	Ziegel- und Kalksandsteinsichtmauerwerk.....	60
3.4.1	Erscheinungsbilder.....	61
3.4.2	Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen.....	62
3.4.3	Nachbesserung.....	66
3.4.4	Zusammenfassung.....	67
3.5	Asbestzement.....	68
3.5.1	Erscheinungsbilder.....	69
3.5.2	Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen.....	70
3.5.3	Nachbesserung.....	72
3.5.4	Zusammenfassung.....	73
3.6	Glas.....	74

4.	Schäden durch Luftverunreinigungen an Metallen.....	75
4.1	Eisen und Stahl.....	79
4.1.1	Erscheinungsbilder.....	80
4.1.2	Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen.....	81
4.1.3	Nachbesserung.....	87
4.1.4	Zusammenfassung.....	88
4.2	Aluminium.....	89
4.2.1	Erscheinungsbilder.....	90
4.2.2	Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen.....	91
4.2.3	Nachbesserung.....	93
4.2.4	Zusammenfassung.....	94
4.3	Zink und Titanzink.....	95
4.3.1	Erscheinungsbilder.....	96
4.3.2	Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen.....	97
4.3.3	Nachbesserung.....	100
4.3.4	Zusammenfassung.....	101
4.4	Kupfer.....	102
4.4.1	Erscheinungsbilder.....	103
4.4.2	Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen.....	104
4.4.3	Nachbesserung.....	107
4.4.4	Zusammenfassung.....	108
4.5	Blei.....	109
5.	Schäden durch Luftverunreinigungen an organischen Baustoffen..	111
5.1	Holz.....	114
5.2	Bituminöse Baustoffe.....	115
5.3	Kunststoffe.....	116
6.	Zusammenfassung.....	123
7.	Quellennachweis.....	128
7.1	Normen.....	128
7.2	Verordnungen, Richtlinien und Merkblätter.....	128
7.3	Fachbücher und Forschungsberichte.....	128
7.4	Fachaufsätze.....	131

1. Vorbemerkungen

Die durch die moderne Industriegesellschaft hervorgerufenen Veränderungen der Zusammensetzung der Luft wirken nicht nur auf Mensch, Tier und Pflanze, sondern auch auf die Oberflächen der Gebäude ein. Es ist unstrittig, daß diese Einwirkungen negative Veränderungen an Baustoffen und Bauteilen hervorrufen können. Diskutiert wird jedoch die Frage, in welchem Umfang die heute an Gebäudeaußenflächen zu beobachtenden Schäden tatsächlich auf Luftverschmutzungen zurückzuführen sind. Normale Alterung und durch fehlerhafte Planung und Ausführung der Gebäude bedingte Bauschäden können nämlich gleiche oder ähnliche Schadensbilder hervorrufen.

Die Klärung der Fragen nach der Einwirkungsart und der Bedeutung der Luftverschmutzung für die Lebensdauer von Bauteilen ist vor allem in zweierlei Hinsicht wichtig:

- Angemessene Schutz- und Sanierungsmaßnahmen an Bauteilen erfordern die Kenntnis der Ursachenzusammenhänge, um kurzfristig den Umfang der durch Luftverschmutzung verursachten Schäden zu vermindern;
- Die Beurteilung des volkswirtschaftlich sinnvollen Aufwandes zur Verminderung der Schadstoffemissionen setzt unter anderem die Kenntnis der Größenordnung der durch diese Aufwendungen verhinderbaren Schäden voraus. Insofern leistet der vorgelegte Bericht, der sich mit den bautechnischen Aspekten der Folgen der Luftverschmutzung befaßt, langfristig auch einen Beitrag zur Beseitigung der primären Schadensursache: nämlich der Luftverschmutzung selbst.

Es ist Aufgabe dieses Querschnittsberichtes, den derzeitigen Kenntnisstand zum o. a. Thema in einer übersichtlichen Dokumentation zusammenzustellen, die es ermöglicht, sich ein allgemeines, umfassendes und objektives Bild über die Bedeutung des Problems der Auswirkungen von Luftverunreinigungen für den Bestand und die Gefährdung von Hochbauten zu verschaffen, wobei einzelnen Detailfragen anhand der angegebenen Literaturquellen vertiefend nachgegangen werden kann.

Als Ausgangsbasis diente die verfügbare, aktuelle Literatur (Fachbücher, Fachzeitschriften, Normen und andere Regelwerke), vom Auftragnehmer bereits durchgeführte Untersuchungen über Schäden an Hochbauten und die langjährigen Erfahrungen aus einer großen Zahl von Schadensbegutach-

tungen sowie von Fachverbänden veröffentlichte Produktinformationen.

Gerade auf dem Gebiet der Instandhaltung und Instandsetzung von Gebäuden fehlen bisher - mit wenigen, nur begrenzt aussagefähigen Ausnahmen - langfristige Statistiken und detaillierte Untersuchungen. Diesen Mangel kann der vorliegende Querschnittbericht nicht ausgleichen, sondern nur aufzeigen. Damit ist aber ein Anfang gemacht, gezielt und effektiv diese noch offenen Fragen durch intensive Forschungsaktivitäten einer Klärung näher zu bringen.

2. Einleitung

Die Begriffe "Luftverschmutzung" und "Luftverunreinigung" werden in der Regel synonym verwendet, sind jedoch in der Literatur bisher nicht eindeutig beschrieben. So kann Luftverunreinigung dann vorliegen, wenn die natürliche Zusammensetzung der Luft, wie sie aus Tabelle 2.1 hervorgeht, durch das Eindringen luftfremder Stoffe verändert wird.

Tabelle 1. Natürliche Zusammensetzung „reiner“ Luft.

Gas-komponente	Anteil [Vol.-%]	Gas-komponente	Anteil [Vol.-%]
Stickstoff	N ₂ 78,10	Neon	Ne 0,0018
Sauerstoff	O ₂ 20,93	Helium	He 0,0005
Argon	Ar 0,93	Xenon	Xe 0,00001
Kohlendioxid	CO ₂ 0,03-0,04	Wasserstoff	H ₂ 0,01
Krypton	Kr 0,0001		

Tabelle 2.1: Natürliche Zusammensetzung "reiner" Luft, (91).

Eine Definition der Weltgesundheitsorganisation (WHO) orientiert sich an den negativen Auswirkungen einer Veränderung der Luftzusammensetzung: "Luftverunreinigung liegt dann vor, wenn sich ein luftverunreinigender Stoff oder mehrere luftverunreinigende Stoffe in solchen Mengen und so lange in der Außenluft befinden, daß sie für Mensch, Tiere, Pflanzen oder Eigentum schädlich sind, zur Schädigung beitragen und Wohlbefinden oder die Besitzausübung unangemessen stören können." (aus: Bayrisches Landesamt für Umweltschutz, 91)

Diese Definitionen werfen Fragen nach Grenzwertbestimmungen auf. Unabhängig von der Beantwortung der Frage nach einer genauen Definition ist unbestreitbar, daß heute unzählige Schadstoffe die Luft belasten. Ihr Nachweis ist meßtechnisch teilweise nicht möglich, so daß heute nur wenige Leitkomponenten gemessen und beschrieben werden. Diese sind im allgemeinen Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO₂), Stickoxid (als NO_x), organische Verbindungen und partikelförmige Luftverunreinigungen in Form von Staub und Ruß.

Die Schadstoffbelastung der Atmosphäre wird vorwiegend durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe verursacht, wobei je nach Schadstoff den Kraftwerken, der Industrie, den Haushalten und dem Verkehr eine unterschiedliche prozentuale Beteiligung zugeschrieben wird (vgl. Tab. 2.2).

Die zeitliche Entwicklung der Schadstoffbelastung der Atmosphäre und die Gesamtemission der letzten Jahre gehen aus der Tabelle 2.2 hervor.

Tab. 1/3: Jahresemissionen - Übersicht*)

Staub Emittentengruppe	1966		1970		1974		1978	
	kt	%	kt	%	kt	%	kt	%
Kraftwerke, Fernheizwerke	460	26	290	22	190	20	170	24
Industrie	1070	59	770	60	590	63	460	64
Haushalte, Kleinverbraucher	250	14	210	16	130	14	60	8
Verkehr	24	1	29	2	30	3	30	4
Gesamtemission	1800		1300		950		720	
Schwefeldioxid Emittentengruppe	1966		1970		1974		1978	
	kt	%	kt	%	kt	%	kt	%
Kraftwerke, Fernheizwerke	1460	42	1840	47	1940	51,5	2000	56
Industrie	1410	40	1380	35	1190	32	990	28
Haushalte, Kleinverbraucher	560	16	630	16	520	14	450	13
Verkehr	70	2	85	2	95	2,5	100	3
Gesamtemission	3500		3950		3750		3550	
Stickoxide (als NO ₂) Emittentengruppe	1966		1970		1974		1978	
	kt	%	kt	%	kt	%	kt	%
Kraftwerke, Fernheizwerke	650	32	820	33	920	34	940	31
Industrie	660	32	690	29	660	24	580	19
Haushalte, Kleinverbraucher	100	5	130	5	140	5	140	5
Verkehr	640	31	820	33	990	37	1340	45
Gesamtemission	2050		2450		2700		3000	
Kohlenmonoxid Emittentengruppe	1966		1970		1974		1978	
	kt	%	kt	%	kt	%	kt	%
Kraftwerke, Fernheizwerke	20	0,2	30	0,2	30	0,3	30	0,3
Industrie	1700	13,8	1780	13,8	1870	16,7	1360	14,7
Haushalte, Kleinverbraucher	6500	52	5400	41	3100	27	1700	18
Verkehr	4300	34	5800	45	6300	56	6200	67
Gesamtemission	12500		13000		11300		9300	
Organische Verbindungen Emittentengruppe	1966		1970		1974		1978	
	kt	%	kt	%	kt	%	kt	%
Kraftwerke, Fernheizwerke	6	0,5	8	0,5	9	0,5	9	0,5
Industrie	350	25	450	26,5	480	27	470	27
Haushalte, Kleinverbraucher	640	46	720	42	710	40	630	35,5
Verkehr	400	28,5	530	31	570	32,5	650	37
Gesamtemission	1400		1700		1800		1750	

*) Werte gerundet

Tabelle 2.2: Jahresemissionen-Übersicht (aus:
Umweltbundesamt, 77, Seite 17)

Die Entwicklung in den letzten Jahren zeigt, daß die Menge der Schadstoffemission dieser nachgewiesenen Schadstoffe leicht rückläufig ist. Diese Tendenz hat sich durch Maßnahmen zum Umweltschutz und zur Reinhaltung der Luft (z. B. Änderung der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft vom 23. Februar 1983, 13. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes vom 22. Juni 1983) weiter positiv entwickelt.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen nicht die Grundsatzdiskussionen über mögliche Definitionen von Luftverunreinigungen fortgeführt werden, sondern

die vorhandenen Erkenntnisse über die nachgewiesenen Schadstoffe der Atmosphäre und ihre Wirkungsmechanismen auf Außenbauteile von Gebäuden zusammengetragen und bewertet werden.

Nicht zu den durch Luftverunreinigungen hervorgerufenen Schäden im Hochbau sollen in dieser Arbeit Schäden an Ingenieurbauwerken, wie Straßen, Brücken, Schienen u. ä., und Umweltschäden gezählt werden, wie sie durch die Verwendung von Tausalz an Gebäuden und anderen Bauwerken hervorgerufen werden. Die erhöhte Chloridbelastung in Meeresnähe ist natürlichen Ursprungs und soll ebenfalls nicht Gegenstand dieser Untersuchung sein.

Durch das Einwirken von Luftverunreinigungen auf die im Hochbau verwendeten Materialien ergeben sich Schäden, die sich in ihrem Erscheinungsbild mit den natürlichen Verwitterungserscheinungen an Außenbauteilen überlagern. Die Wechselwirkung von natürlichen Umwelteinflüssen wie Feuchtigkeit, thermische Beanspruchung, Erosion u. a. und schädigenden Bestandteilen der Atmosphäre erhöht die Belastungen der Umwelt auf ein Außenbauteil und beschleunigt das Verwitterungsverhalten der Baustoffe. Diese Beschleunigung des Verwitterungsverhaltens führt grundsätzlich zu einer Reduzierung der Lebenserwartung eines der Atmosphäre ausgesetzten Baustoffs, wobei das Ausmaß des schädigenden Einwirkens materialabhängig ist und im übrigen zur Zeit wesentlich durch die Gestaltung, Exposition und Einbaubedingungen des Bauteils beeinflusst werden kann. Das Verwitterungsverhalten der Baustoffe wird somit von folgenden Einflüssen bestimmt:

- natürliche Umweltbedingungen
- Schadstoffbelastung der Umwelt
- baustoffspezifische Eigenschaften
- Gebäude- und bauteilspezifische Beanspruchungssituationen.

Das Thema dieser Arbeit "Schäden an Hochbauten durch Luftverschmutzung" macht es erforderlich, auf diese Einflüsse und ihre Wechselwirkung besonders einzugehen. Bevor das jedoch geschehen kann, bedarf es einer grundsätzlichen Klärung der mit diesen Punkten verbundenen Problemstellungen, die in den folgenden Abschnitten angesprochen werden sollen.

2.1 Die Schadstoffbelastung der Umwelt

Die Schadstoffbelastung der Umwelt wirkt hinsichtlich der Schadstoffe, der Schadstoffkonzentration, der Schadstoffaufnahme durch den Baustoff und der Ursachenbestimmung bei den aufgetretenen Schäden eine Reihe von Problemen bei der Erfassung der entstandenen Schäden auf, deren Ausmaß dargestellt werden soll:

Problempunkt: Schadstoffe

Von den vielen meßtechnisch erfaßten Schadstoffen der Atmosphäre besitzen nach den bisherigen Erkenntnissen vor allem Schwefeldioxid (SO_2), Kohlendioxid (CO_2), Stickstoffoxid (NO_x), Ozon (O_3), Fluorwasserstoff, Chlorwasserstoff, Schwefelwasserstoff und partikelförmige Luftverunreinigungen in Form von Staub und Ruß eine schädigende Einwirkung auf die im Bauwesen verwendeten Materialien. Die Schadstoffbelastung der Atmosphäre wird vorwiegend durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe verursacht, wobei je nach Schadstoff den Kraftwerken, der Industrie, den Haushalten und dem Verkehr eine unterschiedliche prozentuale Beteiligung zugeschrieben wird (vgl. Tab. 2.2).

Eine Sonderstellung unter den Schadstoffen nimmt das Kohlendioxid (CO_2) ein. Es ist zu 0,029 Vol.% natürlicher Bestandteil der Atmosphäre und zählt somit zu den natürlichen Umweltbedingungen. Erst der diesen Grenzwert überschreitende Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre, er kann regional stark schwanken, kann daher als Schadstoff betrachtet werden.

Die chemische Zusammensetzung von partikelförmigen Luftverunreinigungen in Form von Staub und Ruß ist sehr unterschiedlich. Durch das Verschmutzen der ihnen ausgesetzten Bauteiloberflächen tragen sie nicht nur zu einer Beeinträchtigung des Erscheinungsbildes bei, sondern sie sind je nach ihrer Zusammensetzung in der Lage, gasförmige Luftverunreinigungen zu absorbieren und können so zur Bildung ätzender Kompressen auf den Bauteilen beitragen, die erhebliche Schäden anrichten können.

Problempunkt: Schadstoffkonzentration

Eine flächenmäßige Aufteilung in unterschiedliche Schadstoffregionen, wie sie für das Korrosionsverhalten der Metalle in Industrie-, Stadt-, Land- und Meeresatmosphäre besteht und mit deren Hilfe man die Verwitterungsgeschwindigkeit in den einzelnen Atmosphärentypen vergleichen kann, ist bei der heutigen, überregionalen Verteilung der Luftverunreinigungen nur sehr bedingt auf andere Baustoffe übertragbar. Es hat sich gezeigt, daß bei der durch die hohen Schornsteine erfolgenden weiträumigen Verteilung der Schadstoffe auch in industriearmen Gebieten Schäden auftreten, die auf eine Immissionsbelastung durch weit entfernt liegende Industrie-

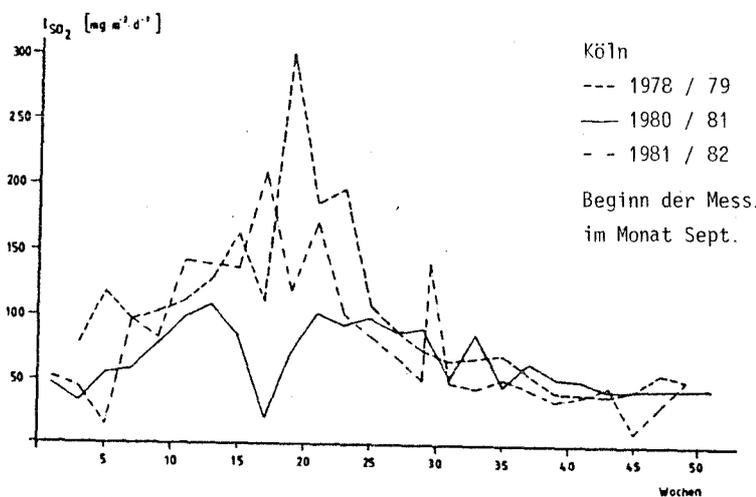


Abb. 2.1: Jahreszeitlicher Verlauf der SO₂-Immissionsrate für den MeBort Köln, (aus: Zallmanzig, 182).

zentren hinweist. Eine überregionale Einteilung in unterschiedliche Belastungsgebiete würde zudem den Einfluß lokaler Emittenten, der unter ungünstigen Bedingungen zu hohen Schadstoffkonzentrationen führen kann, stark vernachlässigen. Die ständig wechselnde Schadstoffkonzentration der Atmosphäre führt zu einer wechselnden Belastung der Materialien. Die Schadstoffkonzentration wird bestimmt durch unregelmäßige Emissionen und meteorologische Einflüsse wie Windgeschwindigkeit, Windrichtung, vertikale Temperaturschichtung, Lufttemperatur und relative Luftfeuchte. Welchen jahreszeitlichen

Schwankungen allein die SO_2 -Immissionsrate ausgesetzt ist, zeigt die Abbildung 2.1. Am Beispiel der Stadt Köln ist nachgewiesen worden, daß die Rate in den Wintermonaten deutlich höher liegt, als in der übrigen Zeit.

Die wechselnde Immissionsbelastung hat dazu geführt, nicht die Schadstoffkonzentration, sondern die "Immissionsrate" als Maßstab zur Ermittlung des schädigenden Einwirkens von Luftverunreinigungen zu benutzen. Die Immissionsrate wurde von Luckat (140) für die Natursteine eingeführt und ist die von einer Flächeneinheit in einer Zeiteinheit aufgenommene Schadstoffmenge. Eine solche Immissionsrate beendet mögliche Diskussionen um einen Wirkungsschwellenwert der Immissionsbelastung, weil Luckat eine schädigende Wirkung für jede Immissionsrate größer Null annimmt. Die Übertragung dieser Methode auf andere mineralische Baustoffe ist denkbar, wird jedoch in der Praxis sehr umständlich sein und meßtechnische Probleme aufwerfen.

Problempunkt: Schadstoffaufnahme

Die Aufnahme der Schadstoffe durch einen Baustoff erfolgt grundsätzlich über den Weg der trockenen Deposition und über den Weg der nassen Deposition.

Bei der trockenen Deposition lagern sich gasförmige Luftverunreinigungen auf der Bauteiloberfläche und bei porösen Materialien auch in den offenen Poren des Baustoffs ab.

Bei der nassen Deposition werden die Luftverunreinigungen durch Feuchtigkeit der Atmosphäre (z. B. Regen, Nebel) gelöst und wirken als gelöste Schadstoffe auf das Bauteil ein. Schädigungen durch Luftverunreinigungen gehen in der Regel von beiden Arten der Schadstoffaufnahme aus.

Diese verschiedenen Arten der Schadstoffaufnahme lassen erkennen, daß es nicht ausreicht, wie vielfach in der Literatur beschrieben, den sauren Regen mit seinen regional unterschiedlichen pH-Werten als alleinigen Verursacher für die auftretenden Schäden verantwortlich zu machen, sondern daß es hier einer differenzierten Betrachtungsweise bedarf.

Problempunkt: Ursachenbestimmung

Schwierigkeiten treten dann auf, wenn man versucht, daß Ausmaß der durch Luftverunreinigungen aufgetretenen Schäden zu bestimmen. Die Überlagerung der Einwirkung natürlicher Umweltbedingungen mit den Schadstoffen der Atmosphäre, die Wechselwirkung der schädigenden atmosphärischen Luftverunreinigungen untereinander sowie die Überlagerung mit gleichen oder ähnlichen Erscheinungsbildern beim Auftreten von ausführung- oder planungsbedingten Bauschäden machen eine eindeutige Ursachenbestimmung bei der Schadensanalyse meist nicht möglich.

Auch aus statistischer Sicht sind verlässliche Aussagen kaum zu erhalten, da mit wenigen Ausnahmen weder heute, noch in zurückliegender Zeit ausreichend detaillierte Statistiken über die mittlere Lebensdauer von Bauteilen, Baustoffen und Beschichtungen geführt wurden, aus deren Vergleich man zahlenmäßige Rückschlüsse auf den Einfluß der Veränderung der Luftzusammensetzung auf das durchschnittliche Baustoffverhalten ziehen könnte.

Selbst vorhandene Aufstellungen mit Aussagen über die technische Lebensdauer in zurückliegender Zeit sind mit der heutigen Situation meist nur sehr begrenzt vergleichbar, da bei den notwendigerweise langen Beobachtungszeiträumen die angewandten Baustoffe und Bauverfahren einem erheblichen Wandel unterworfen sind (mit diesem Problem wurden die Auftragnehmer z. B. bei der Untersuchung des Langzeitverhaltens von Flachdächern exemplarisch konfrontiert (191).

Laborversuche, die das Ausmaß der schädigenden Einwirkung einzelner Schadstoffe auf ausgewählte Baustoffe beschreiben, geben für die Wissenschaft erste qualitative Hinweise. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Praxis ist jedoch bisher aufgrund der Vielzahl möglicher Einflußfaktoren nur sehr begrenzt möglich.

2.2 Die Exposition der Baustoffe

Es ist eine allgemeine Erfahrung, daß die aus gleichartigen Baustoffen bestehenden Oberflächen eines Gebäudes meist keine gleichmäßigen Schädigungen aufweisen. Die Konzentration der Schäden auf bestimmte Oberflächenbereiche zeigt, daß die Exposition des Baustoffs eine wesentliche Einflußgröße darstellt. Es sind folgende Faktoren zu unterscheiden:

- **Oberflächengröße - Kontaktfläche**
Eine nicht poröse, rissfreie, glatte Bauteiloberfläche bietet den Schadstoffen sowohl in gasförmiger als auch in gelöster, flüssiger Form eine um ein Vielfaches kleinere Kontaktfläche als ein porenreiches, mit Rissen überzogenes oder mit rauher Oberflächenform gestaltetes Bauteil. So kann z. B. ein schlecht verdichteter, mit zu hoher Wasserzugabe hergestellter Beton eine große Porosität und eine Vielzahl von Schwindrissen aufweisen. Ein gleichbewitterter, aus den gleichen Grundbestandteilen fachgerecht hergestellter Beton wird wesentlich geringere Beschädigungen durch Umwelteinflüsse aufweisen, als der mangelhaft hergestellte Beton, da die Kontaktflächen erhebliche Unterschiede aufweisen.
- **Oberflächenorientierung - Einwirkungsdauer**
Die Einwirkungsart und -dauer der Schadstoffe kann im Bereich ein und desselben Gebäudes außerordentlich unterschiedlich sein.
- **Gegen Regen und abfließendes Wasser geschützt**
Liegende Bereiche (Gesims-, Kragplattenunterseiten) werden überwiegend durch Schadstoffe nur in gasförmiger Form beansprucht;
- **bei senkrechten bzw. nur mit ausreichendem Gefälle versehenen, gering porösen Oberflächen**
ist die Einwirkung von Niederschlägen auf die Dauer des Regens beschränkt;
- **"gefällose", in der Regel Gegengefälle mit Pfützenbildungen aufweisende horizontale Oberflächen,**
werden nicht nur wesentlich länger durch Niederschlagswasser beansprucht, im Zusammenwirken mit den Schmutzablagerungen auf horizontalen Flächen ist die Schadstoffkonzentration im Niederschlagswasser wesentlich erhöht.

Die größten Korrosionserscheinungen an Zinkregenrinnen treten z. B. regelmäßig an den Stellen auf, wo die Pfützen gefälloser Dachflächen

über lange Zeit abtropfend entwässern, da dort ein durch Schmutzablagerungen und Verdunstung erheblich mit Schadstoffen angereichertes Wasser langfristig auf die Metalloberflächen einwirken kann (zur Oberlagerung mit den Problemen der Bitumenkorrosion s. Abschnitt 5.2).

- Oberflächenschutz

Die Behandlung der Oberflächen mit Beschichtungen, Anstrichen, Imprägnierungen kann in zweifacher Weise schützend wirken:

- Durch porenverschließende oder hydrophobierende Maßnahmen wird die Kontaktoberfläche mit Niederschlagswasser und die Einwirkungsdauer des Niederschlags vermindert;
- die Schadstoffe wirken nicht mehr unmittelbar auf die Oberfläche des geschützten Baustoffs, sondern auf die Oberfläche der Schutzschicht ein. Eine sinnvolle Schutzmaßnahme liegt dann vor, wenn die Schutzschicht entweder eine höhere Resistenz gegenüber den einwirkenden Verunreinigungen hat als der geschützte Baustoff oder wenn die Erneuerung der angegriffenen Schutzschicht einfacher und kostengünstiger als die Erneuerung der geschützten Oberfläche selbst ist.

Die dargestellten Fakten lassen in zweifacher Hinsicht Schlußfolgerungen zu.

1. Durch eine sinnvolle Gestaltung und sorgfältige Herstellung der Bauteile kann die Einwirkungsmöglichkeit von Schadstoffen wesentlich vermindert werden.
2. Bei sehr vielen Schädigungsformen ist es sowohl im Einzelfall, auch in der statistischen Gesamtsicht außergewöhnlich schwierig zu unterscheiden, ob eine Schadenszunahme auf ungünstige Konstruktionsweisen und Ausführungsgepflogenheiten oder auf eine Zunahme der Schadstoffkonzentration zurückzuführen ist. (So ist z. B. zu fragen, ob die in den Kostenermittlungen von Heinz (131) in Tab. 2.3 angenommene Verminderung der Lebensdauer von Zinkblechdachrinnen ("belastete Gebiete": 10 - 12 Jahre; "ländliche Gebiete": 30 Jahre) tatsächlich überwiegend auf Luftverschmutzungen oder nicht eher auf die in städtischen Gebieten seit ca. 30 Jahren weitverbreitete Flachdachbauweise mit schlecht geschützten, bituminösen Dachabdichtungen zurückzuführen ist.)

2.3 Das Verwitterungsverhalten der Baustoffe

Die Vielzahl der beschriebenen Einflußgrößen, die das Ausmaß der schädigenden Wirkung von Luftverunreinigungen bestimmen, vor allem die Überlagerung mit den natürlichen Umweltbedingungen und Bau-schäden, machen es schwierig, eine Grenze zwischen dem natürlichen Verwitterungsprozeß, dem die Baustoffe an der Atmosphäre ausgesetzt sind und den Schäden, die auf Luftverunreinigungen zurückzuführen sind, zu bestimmen. Sicher ist, daß bei den meisten Baustoffen durch das Einwirken von Schadstoffen der Verwitterungsprozeß beschleunigt und die Lebensdauer der Bauteile reduziert wird.

In welcher Geschwindigkeit der Verwitterungsprozeß fortschreitet, ist nicht zuletzt von den Eigenschaften der Baustoffe abhängig und ist bisher in der Literatur nur annähernd für den Bereich der metallischen Baustoffe nachgewiesen. Hier wird davon ausgegangen, daß der Schichtdickenverlust von Korrosionsschutzbeschichtungen in stark belasteten Gebieten (Industrieatmosphäre) 4 bis 6 mal höher liegt als in unbelasteten Gebieten.

Fördernde Wirkung für das Einwirken von Luftverunreinigungen sowie für den Verwitterungsprozeß stellen auch bautechnische Fehler und Mängel dar. Mangelhaft geplante und ausgeführte Bauteile (z. B. fehlende Tropfkanten, Risse, mangelhafter Korrosionsschutz u. a.) bieten den Luftverunreinigungen die Möglichkeit, an solchen Schwachstellen verstärkt anzugreifen und Schäden in beträchtlichem Umfang hervorzurufen. Es ist leider nicht selten zu beobachten, daß derartige primär auf bautechnisch vermeidbare Fehler zurückführbare Zerstörungen pauschal und undifferenziert den Schäden durch Luftverunreinigung zugeschrieben werden.

2.4 Nachbesserung

Die durch die Luftverunreinigung hervorgerufenen Bauschäden, die Beschleunigung des Verwitterungsverhaltens und die damit verbundene Reduzierung der Lebensdauer machen zusätzliche Nachbesserungsarbeiten mit zum Teil erheblichem Umfang an Außenbauteilen notwendig. Umfang und Form der auszuführenden Nachbesserungsarbeiten richten sich grundsätzlich nach dem Ausmaß der aufgetretenen Schäden und sollen in einem ausgewogenen Verhältnis zur noch zu erwartenden Lebensdauer des Gesamtbauteils bzw. des Gebäudes stehen.

Die Nachbesserungsarbeiten werden in Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen unterschieden.

Die Instandhaltungsmaßnahmen dienen dem vorbeugenden Schutz der der verunreinigten Atmosphäre ausgesetzten Bauteile. Sie beinhalten im wesentlichen Wartungs- und Reinigungsarbeiten, wie zum Beispiel das Erneuern von Korrosionsschutzbeschichtungen oder das Reinigen der Bauteile von Verschmutzungen, um das Erscheinungsbild bestehender Gebäude zu erhalten, und um schädigende Einwirkungen von Luftverunreinigungen zukünftig möglichst auszuschließen. Die in schadstoffbelasteten Gebieten im Vergleich zu unbelasteten Gebieten in kürzeren Zeitabständen notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen weisen darauf hin, daß die Luftverunreinigungen für einen vergrößerten Umfang der Instandhaltungsmaßnahmen eines Gebäudes verantwortlich sind.

Instandsetzungsmaßnahmen sind dann erforderlich, wenn durch den Einfluß natürlicher Umweltbedingungen und den Luftverunreinigungen Schäden aufgetreten sind, und das Bauteil oder das Gebäude durch entsprechende Maßnahmen vor weiterer Zerstörung geschützt werden und/oder die Funktionsfähigkeit aufrechterhalten bleiben soll. Es sind solche Instandsetzungsmaßnahmen notwendig, die einerseits die Funktionsfähigkeit der beschädigten Bauteile wiederherstellen und andererseits einen ausreichenden, vorbeugenden Schutz gewährleisten können.

Die durch die Luftverunreinigungen notwendigen erhöhten Aufwendungen für Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen können sich im Hinblick auf die Erhaltung bestehender Gebäude als nicht unerheblicher Kostenfaktor erweisen.

2.5 Kostenermittlung

Die Frage nach einer kostenmäßigen Erfassung der durch Luftverunreinigungen verursachten Schäden an Gebäuden und ihre volkswirtschaftliche Bedeutung konnte bisher nur unzureichend beantwortet werden. Es fehlen die für eine umfassende Kostenerfassung verlässlichen Daten über gesicherte Messungen und Beschreibungen der notwendig gewordenen Nachbesserungs-, Unterhaltungs- und Wartungsarbeiten in Abhängigkeit von Zeit und Immission.

So handelt es sich bei den heute angegebenen Aussagen über das materielle Ausmaß der Schäden in der Regel um mehr oder minder grobe Schätzungen, deren zahlenmäßige Angaben großen Schwankungen unterworfen sind.

Die Erfassung gesicherter Erkenntnisse über die volkswirtschaftlichen Verluste, die durch die Luftverunreinigungen an Gebäuden hervorgerufen werden, kann vor allem bei einer Kostenbewertung möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen von Bedeutung sein. Aus diesem Grund erfolgen trotz der auftretenden Schwierigkeiten, wie der Einschätzung

- des Umfangs der aufgetretenen Schäden,
- des Umfangs notwendiger Nachbesserungsarbeiten,
- nicht mehr nachvollziehbarer Wartungsarbeiten und
- der unbestimmten Immissionsbelastung

Kostenschätzungen, die prinzipiell auf zwei unterschiedlichen methodischen Ansätzen beruhen. So vergleicht Heinz (44) die Zusatzaufwendungen, die für ausgewählte Sachgütergruppen in belasteten Gebieten notwendig sind, mit den Aufwendungen, die in ländlichen Gebieten erforderlich sind. Hierbei werden die erhöhten Aufwendungen, die in schadstoffbelasteten Gebieten notwendig sind, auf Luftverunreinigung zurückgeführt. Die Untersuchung (1980) ergab Korrosionsschäden durch Luftverunreinigungen, die sich auf 1 bis 2 Milliarden DM/Jahr belaufen. Die gesamten volkswirtschaftlichen Verluste betragen hiernach 3 bis 4 Milliarden DM (vgl. Tabelle 2.3).

Schadenskategorie	Durchschnittliche Lebensdauer (Jahre)		Volkswirtschaftliche Verluste (Mio. DM/Jahr)
	ländliche Gebiete	belastete Gebiete	
<u>Wohngebäude</u>			
Fassadenanstriche	11	5—6	741
Fensteranstriche	3,5	2,5	298
Sonstige Außenanstriche	7	4	191
Dachrinnen (Zinkblech)	30	10—12	288
<u>Korrosionsschutzanstriche</u>			
Autobahnbrücken	20	10	15
Brückengeländer an Überführungen von Bundesautobahnen	14	9	0,37
Eisenbahnbrücken	18	18 (Einsatz höherwertiger Systeme)	4,4
Fahrleitungsmaste	30—40	10—12	5
Auswechseln von Fahrleitungsbauteilen	30—40	10—12	3,6
Hochspannungsmaste	14	7—9	4,5
Korrosionsschäden durch Luftverunreinigungen insgesamt: 1—2 Mrd. DM/Jahr			
<i>b) Zusätzlicher Reinigungsaufwand</i>			
Schadenskategorie	Durchschnittliche Aufwandshäufigkeit bzw. -menge		Volkswirtschaftliche Verluste (Mio. DM/Jahr)
	ländliche Gebiete	belastete Gebiete	
Fensterreinigung	4 x pro Jahr	6 x pro Jahr	104
Textilreinigung	157 kg Wäsche pro Person und Jahr	200 kg Wäsche pro Person und Jahr	735
Summe: 3—4 Mrd. DM/Jahr			

Tabelle 2.3: Immissionsbedingte Materialschäden in der Bundesrepublik (INFU-Institut, 1980, aus: Umweltbundesamt, 78, S. 41)

Obwohl dieses Berechnungsverfahren verschiedene Unsicherheiten birgt, ist es nach dem augenblicklichen Stand der Erkenntnisse das einzige Verfahren, das einen Hinweis auf die Größenordnung immissionsbedingter Materialschäden andeutet.

Schadstoff- und materialspezifische Aussagen sind prinzipiell mit einem zweiten methodischen Ansatz zur Erfassung der volkswirtschaftlichen Schäden durch Luftverunreinigungen möglich. Diese Berechnungen mit Hilfe der Dosis-Wirkung-Beziehung sind sehr aufwendig und erscheinen für eine umfassende Kostenabschätzung bei der augenblicklich nicht ausreichend vorhandenen Datenerfassung der aufgetretenen Schäden nicht geeignet.

Die Berechnungsverfahren deuten die Schwierigkeiten an, die bei der kostenmäßigen Erfassung der aufgetretenen Schäden zu erwarten sind. Für eine auf den Hochbau bezogene Aussage ist bei der Berechnung von Heinz (44) zu berücksichtigen, daß in die Schadenskategorie Bereiche mit einbezogen werden, die nicht eindeutig dem Hochbau zuzuordnen sind (vgl. Tab. 2.3). Andere Bereiche, wie die Schäden an mineralischen Baustoffen sowie der Aufwendungen für die Erforschung immissionsbedingter Schäden und die Entwicklung widerstandsfähiger Materialien bzw.

Schutzmaßnahmen sind dagegen in dieser Aufstellung nicht vollständig erfaßt, so daß die angegebenen volkswirtschaftlichen Verluste, die im Hochbau durch den schädigenden Einfluß von Luftverunreinigungen entstehen, durch diese Berechnung nur sehr unzureichend wiedergegeben werden. Genauso wie für die Kostenermittlung aller im Hochbau durch Luftverunreinigungen verursachten Schäden, fehlen bisher verlässliche Daten für die an den einzelnen Baustoffen hervorgerufenen Schäden. Aus diesem Grund kann in der vorliegenden Arbeit nur begrenzt auf die Kostenerfassung der an den einzelnen Baustoffen auftretenden Schäden eingegangen werden.

2.6 Gliederung

Im folgenden wird der derzeitige Kenntnisstand über das Zusammenwirken zwischen den Schadstoffen in der Luft mit den häufigsten Baumaterialien des Hochbaus dargestellt.

Es ist dabei sinnvoll, die Baustoffe entsprechend den üblichen baustoffkundlichen Gliederungen zusammenzufassen, da eine ähnliche stoffliche Zusammensetzung meist ähnliche Reaktionen auf die Einflüsse der Luftverschmutzung zur Folge hat.

Die Gliederung der Einzelabschnitte erfolgt weitgehend nach einem relativ strengen, einheitlichen Schema: Nach einer einleitenden, kurzen Würdigung der Bedeutung des jeweiligen Baustoffs für das Bauwesen werden zunächst die Erscheinungsbilder der möglichen Schädigungen durch Luftverschmutzung dargestellt, um dann nach Schadstoffen gegliedert die einzelnen Schädigungsvorgänge zu beschreiben. Abschließend wird auf die Schadensvorbeugung und Schadensbeseitigung eingegangen. Die wichtigsten Ergebnisse jedes Abschnitts werden jeweils zusammengefaßt.

Die einzelnen Abschnitte sind so verfaßt, daß im Sinne eines Nachschlagewerks für jede Baustoffgruppe ohne umfangreiche Querverweise alle wichtigen Informationen gegeben werden. Ein solches, auf die schnelle Benutzung von Teilbereichen angelegtes Gliederungsprinzip macht Wiederholungen bestimmter Passagen unvermeidlich, wenn nämlich gleiche Schädigungsmechanismen bei verschiedenen Baustoffen auftreten.

Die große sehr heterogene Gruppe der Natursteinbaustoffe wurde nur im Überblick abgehandelt, da zu diesem, gerade im Hinblick auf die Luftverschmutzung, wichtigen Thema eine gesonderte Forschungsarbeit im Auftrag des Bundesministers für Forschung und Technologie

vorgelegt wird.

3. Schäden durch Luftverunreinigungen an anorganischen, mineralischen Baustoffen

Die anorganischen, mineralischen Baustoffe zählen hinsichtlich der Natursteine, der Ziegel und des Mörtels zu den ältesten Materialien des Hausbaus; Beton und Stahlbeton stellen wesentliche Konstruktionsbaustoffe des modernen Bauwesens dar. Von Gebäuden aus anorganischen, mineralischen Baustoffen wurde in zurückliegender Zeit eine äußerst große Dauerhaftigkeit bei geringem Instandhaltungsaufwand erwartet. Um so alarmierender haben die Berichte über die erheblichen Zerstörungen an Natursteindenkmälern und Sichtbetonaußenbauteilen gewirkt.

Die durch Luftverunreinigungen schadensbetroffenen anorganischen, mineralischen Baustoffe sind meist porös und weisen meist im Stoffgefüge Bindemittel auf, die für die Festigkeitseigenschaften bestimmend sind. Häufig wirken die Schadstoffe der Luft gerade auf diese Bindemittel ein und führen so zu Zerstörungen. Im einzelnen sind jedoch die Schädigungsformen und Schadensursachen zum Teil sehr unterschiedlich. Darauf wird im folgenden detailliert eingegangen werden.

3.1 Natursteine



Abb. 3.1: Unterschiedliche Verwitterung von Natursteinmauerwerk, geschützt und freiliegend



Abb. 3.2: Starker Materialabtrag durch Verwitterung

Die seit der Jahrhundertwende progressiv zunehmenden Verwitterungserscheinungen an Natursteinfassaden historischer Gebäude und an Natursteindenkmälern haben in der jüngsten Vergangenheit die Diskussion um eine ursächliche Beteiligung luftverunreinigender Schadstoffe bei den auftretenden Schäden zunehmen lassen. Zahlreiche Verwitterungserscheinungen an Kulturdenkmälern zeigen Schäden, die, wenn überhaupt, nur mit sehr hohem Arbeits- und Kostenaufwand restauriert werden können.

Die Schadensbilder der betroffenen Bauteile und Gegenstände weisen Verwitterungserscheinungen auf, die starke Schädigungen an der Oberfläche von Natursteinmauerwerken, besonders an den Profilen zeigen, und bis zur Zerstörung der Bausubstanz führen können. Kunstgegenstände aus Naturstein wie Statuen und Ornamente sind teilweise bis zur Unkenntlichkeit zerstört.

Die oft irreparablen Schäden führen jedoch nicht nur zu unüberschaubaren materiellen Kosten, sondern gleichzeitig zu einem endgültigen Verlust der Kulturdenkmäler mit ihren nicht erfaßbaren kulturhistorischen Werten.

Die Forschung auf dem Gebiet der Natursteinverwitterung und deren Vermeidung ist im Vergleich zu den anderen Baustoffen im Hochbau schon weit fortgeschritten. Aufgrund der zahlreichen Veröffentlichungen, Untersuchungen und einer vom Bundesministerium für Forschung und Technologie in Auftrag gegebenen Forschungsarbeit, die sich speziell mit den Auswirkungen der Luftverunreinigungen auf Natursteine beschäftigt, soll in dieser Arbeit nur eine kurze Übersicht über den augenblicklichen Stand der Erkenntnisse erfolgen.

3.1.1. Erscheinungsbilder

Die aufgrund des Einwirkens von Luftverunreinigungen entstehenden Schäden weisen häufig Erscheinungsformen auf, die sich mit den Schadensbildern des natürlichen Verwitterungsprozesses überlagern. Die Beteiligung von Luftverunreinigung ist oft nur über die Geschwindigkeit der Schadensentwicklung und mit Hilfe von Materialuntersuchungen nachweisbar.

Folgende Schädigungsformen sind zu unterscheiden:

An der Oberfläche von Natursteinfassaden zeigen sich schmutzig-weiße bis schmutzig-gelbe Ausblühungen und Krustenbildungen, die auf die Kristallisation von gelösten Salzen zurückzuführen sind.

Typische Gesteinerstörungen zeigen sich an der Oberfläche von Natursteinfassaden in Form von Absanden, schalenförmigen oder trichterförmigen Abplatzungen und Bröckelzerfall. Diese Zerstörungen können soweit fortschreiten, daß Formen und Profile von Denkmälern und Bauwerken nicht mehr zu erkennen sind.

Die durch partikelförmige Luftbestandteile hervorgerufenen dunklen Ablagerungen werden bei Natursteindenkmälern meist nicht als "Verschmutzung", sondern als "Patina" empfunden, so lange diese Ablagerungen relativ gleichmäßig erfolgen und nicht schädigend wirken. Insbesondere wenn Niederschlagswasser verschiedene Fassadenbereiche unterschiedlich stark beaufschlagt, können jedoch sehr unterschiedliche Verschmutzungen in Form von "Streifen", "Fahnen" und "Girlanden" auftreten, die das Erscheinungsbild der ursprünglichen Fassadengliederung stark beeinträchtigen und daher sehr störend wirken.

3.1.2 Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen



Abb. 3.3: Ausblühungen auf einer Sandsteinfassade nach Schlagregenbelastung

Die Untersuchungen auf dem Gebiet der Natursteinerhaltung weisen dem gestiegenen Schadstoffgehalt der Atmosphäre eine beschleunigte Beteiligung bei dem Zerfall von Natursteinen zu.

Aus diesem Grund werden die Schadstoffe der Atmosphäre als eine Verwitterungskomponente eingeordnet, die in Kombination mit den anderen Komponenten (Umweltbedingungen wie: Temperaturschwankungen, Erosion, Wasseraufnahme bzw. -abgabe, Frost-Tauwechsel, Einwirken von Salzen) eine beschleunigte Verwitterung verursachen und gleichzeitig durch ihr Einwirken das Ausmaß der schädigenden Wirkung der Umweltbedingungen wiederum verstärken.

Das zu einer beschleunigenden Verwitterung der Natursteine beitragende direkte Einwirken der atmosphärischen Schadstoffe SO_2 , CO_2 , Staub und Ruß ist allgemein bekannt, und kann auch nicht von vereinzelt anzutreffenden Aussagen über eine Beteiligung schwefelhaltiger, bakterieller Stoffwechselprodukte widerlegt werden.

Neben diesen Schadstoffen, deren schädigende Wirkungsmechanismen nachgewiesen sind, besitzt eine erhöhte Chlorid-, Ammoniak- und/oder Fluoridkonzentration der Atmosphäre eine besondere Bedeutung bei der Gesteinverwitterung (Knöfel (55)), deren Zusammenhänge jedoch bisher nicht eindeutig geklärt worden sind. Offen bleibt bisher auch die Frage nach der Wirkung bestimmter Schadstoffkombinationen, über die zur Zeit ebenfalls noch keine Untersuchungsergebnisse vorliegen.

Als Bestimmungsgröße für das Ausmaß der schädigenden Einwirkung luftverunreinigender Stoffe, kann die Aufnahme des sauren Niederschlags, dessen Säuregehalt durch den pH-Wert bestimmt wird, nicht als der alleinige Indikator angesehen werden. Die verstärkt an den schlagregenabgewandten Seiten auftretenden Schäden weisen in einigen Beispielen darauf hin, daß der Aufnahme gasförmiger Schadstoffe, die in Verbindung mit Feuchtigkeit (im Baustoff, Nebel oder Tauwasser) zu Säuren hoher Konzentration reagieren können, ebenfalls eine entscheidende Bedeutung bei der schädigenden Wirkung der Luftverunreinigung zukommt und das Ausmaß der entstehenden Schäden mit bestimmt.

Neben der Menge der in der Luft enthaltenen Schadstoffe und deren Aggregatzustand ist der Naturstein selber eine Bestimmungsgröße für das Ausmaß der schädigenden Wirkung von Luftverunreinigung. So sind die Natursteine hinsichtlich ihrer Verwitterungseigenschaften zu unterscheiden. Als Beurteilungskriterien wird deren Porosität und dessen Bindemittel herangezogen. Allgemein gelten carbonatisch gebundene Sandsteine mit calcitischen oder dolomitischen Bindemitteln, die mit SO₂ bzw. CO₂ reagieren können, als besonders gefährdet.

Dies gilt ebenso für poröse Kalksteine, deren Wasseraufnahmefähigkeit ein Hinweis für das gute Eindringvermögen von in Wasser gelösten Schadstoffen darstellt. Widerstandsfähiger sind dichte Kalksteine, Marmor sowie silikatisch und quarzitisch gebundene Sandsteine.

Knöfel hat eine systematische Gliederung der Natursteine hinsichtlich ihrer Verwitterungsbeständigkeit aufgestellt:

C Eigenschaften der Gesteine*

Gesteinsart	Porosität/ Wasseraufnahme	Festigkeit	Verwitterungs- beständigkeit
Magmatische Gesteine	günstig	sehr hoch	sehr gut
Sedimentgesteine quarzitische Sandsteine dichte Kalksteine dichte quarzitische Grauwacken	günstig	hoch	sehr gut bis gut
andere Sedimentgesteine	z.T. ungünstig	niedrig	mäßig bis gut
Metamorphe Gesteine Marmor, Quarzit dichte Gneise	günstig	sehr hoch	sehr gut bis gut
andere metam. Gesteine	z.T. ungünstig	niedrig	gut bis mäßig

* Innerhalb der Gruppen vereinfacht/pauschalisiert, deshalb können einzelne Gesteinsvorkommen ganz entscheidend von diesen Anhaltsangaben abweichen

Abb. 3.1: Eigenschaften der Gesteine

Die Aussagen über den Schadstoffgehalt der Atmosphäre, die Form der Schadstoffaufnahme sowie die Porosität des Natursteins geben als Einzel-faktoren keinen ausreichenden Hinweis auf das Einwirken der Luftverunreinigung auf das Material. Zur Beschreibung dieses Einwirkens hat Luckat, (60), die Bestimmung einer Immissionsrate, d. h. der von einer Flächeneinheit des Materials in einer Zeiteinheit aufgenommenen Schadstoffmenge, eingeführt. Sie kann eine Hilfe zur Feststellung der Schadstoffeinwirkung aus der Atmosphäre bei porösen Baustoffen sein.

Anhand dieser Aussagen wird bereits deutlich, daß ein enger Zusammenhang zwischen der natürlichen Verwitterung, die ein Naturstein bei Anwendung in Bauwerken aufgrund der Umweltbedingungen erfährt, und der schädigenden Einwirkung von Schadstoffen der Atmosphäre besteht, deren Grenzen nicht eindeutig festzulegen sind.

Die Wechselwirkung der bestehenden Einflußgrößen bei der Verursachung der beschriebenen Erscheinungsbilder läßt eine quantitative Erfassung der Beteiligung der Einzelfaktoren bisher nicht zu. Aus diesem Grund sind auch die bei den Natursteinen durch die Luftverunreinigung entstehenden (volkswirtschaftlichen) Kosten über grobe Schätzungen hinaus nicht zu bestimmen.

Bestehen bleibt jedoch aus den bisherigen Untersuchungen die qualitative Erkenntnis, daß die Luftverunreinigung eine beschleunigende Wirkung auf den Verwitterungsprozeß ausübt. Um der beschleunigten Verwitterung Einhalt zu gebieten, werden die beschädigten historischen Gebäude mit großem Aufwand unter wissenschaftlicher Beratung restauriert.

Im folgenden sollen die schädigenden Wirkungen von SO_2 , CO_2 , Staub und Ruß auf Natursteine im Rahmen dieser Übersicht näher betrachtet werden.

Schwefeldioxid

Der in der verunreinigten Atmosphäre enthaltene gasförmige Schadstoff Schwefeldioxid (SO_2) gilt als der wichtigste Indikator für den Grad der Luftverunreinigung. Die Aufnahme des Schadstoffs erfolgt über verschiedene physikalische Wege, wobei nach

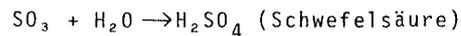
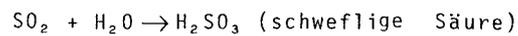
- nasser Deposition und
- trockener Deposition

unterschieden werden kann.

Bei der nassen Deposition erfolgt die Schadstoffaufnahme kapillar. Hierbei dringt das in der Atmosphäre mit Feuchtigkeit reagierende Schwefeldioxid (SO_2) als schweflige Säure (H_2SO_3), oder stärker konzentriert als Schwefelsäure (H_2SO_4) in den Naturstein ein.

Bei der trockenen Deposition erfolgt die Aufnahme von SO_2 über die Diffusion und erst die chemische Reaktion mit Feuchtigkeit im Bauteil führt zur Bildung der schwefligen Säure bzw. der

Schwefelsäure. Die Reaktionen erfolgen nach folgenden Gleichungen:

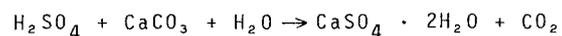


In beiden Fällen ist das Vorhandensein von Feuchtigkeit, sei es bereits vor dem Bauteil (Regen, Tau, Nebel) oder im Bauteil selber, die Voraussetzung für die Umwandlung von SO_2 in die aggressiven Medien der schwefligen Säure bzw., nachdem SO_2 an der Atmosphäre zu SO_3 aufoxidiert ist, in die Schwefelsäure.

Schwefeltrioxid (SO_3) entsteht durch "... unmittelbare Oxidation von SO_2 mit Luftsauerstoff, Ozon und Stickstoffoxiden, aber auch unter katalytischer Mitwirkung von oxidischen Verbindungen des Eisens, Bleis, Aluminiums, von Ruß oder Staub bei Raumtemperatur ...". (Knöfel, 131)

Kritisch beurteilt Riederer (154) diese Reaktion von Schwefeldioxid zu Schwefeltrioxid in der Atmosphäre. Er hält eine Schwefeltrioxidbildung nur im Temperaturbereich von 400 - 600°C in Gegenwart von Katalysatoren für möglich. Die Verwitterungsursachen sieht er, neben dem Einfluß des Klimas, im Einfluß von Mikroorganismen, deren säurehaltigen Stoffwechselprodukte zu ähnlichen Gefügezerstörungen führen wie die Einwirkung der Schwefelsäure. Luckat (141) weist jedoch schon 1973 auf zahlreiche wissenschaftliche Beobachtungen, Belege und Beweise hin, die von der Tatsache ausgehen, daß in der Atmosphäre Schwefelsäure aus Schwefeldioxid entsteht. Diese Meinung wird auch von Knöfel (55) vertreten.

Im Natursteinmauerwerk selbst kann sich SO_2 gasförmig, die entstandenen Säuren können sich kapillar oder osmotisch verteilen. Die schädigende Wirkung von SO_2 erfolgt an kalkhaltigen Baustoffen durch die Bildung von Gips, wobei das schwerlösliche Bindemittel Calciumcarbonat (CaCO_3) durch die Reaktion mit Schwefelsäure (H_2SO_4) und Feuchtigkeit (H_2O) in das leichtlösliche Calciumsulfat-Dihydrat ($\text{CaCO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) überführt wird.



Die Bildung von Gips führt bei Natursteinen zu zwei verschiedenen, sich überlagernden Angriffsformen.

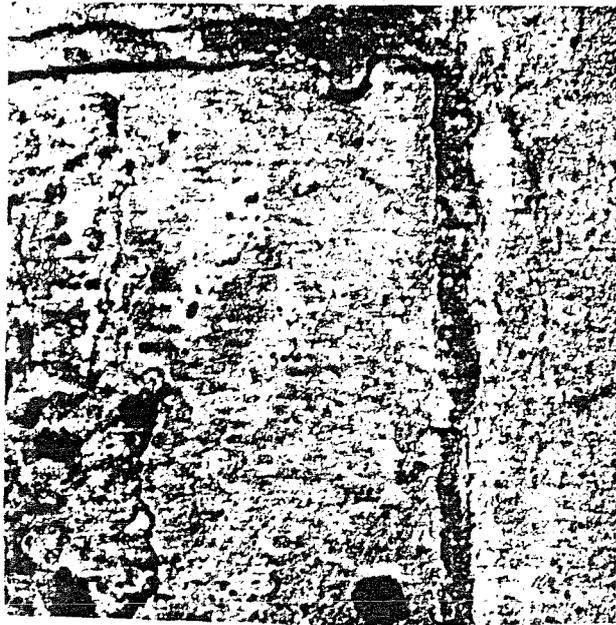
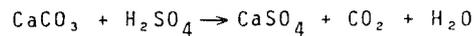


Abb. 3.4: Kristallisation von Salzen auf Naturstein

Lösender Angriff

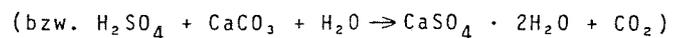
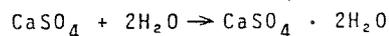
Beim lösenden Angriff von SO_2 und Folgeprodukten auf den Naturstein erfolgt die Schädigung durch das Herauslösen des Bindemittels durch Abführen von in Lösung bleibenden Reaktionsprodukten mit Wasser nach folgender Reaktionsgleichung:



Hierbei wird das schwerlösliche Bindemittel Calciumcarbonat (CaCO_3) durch den Angriff der Schwefelsäure (H_2SO_4) in das leichtlösliche Calciumsulfat (CaSO_4) umgewandelt und bei der Anwesenheit von Wasser ausgewaschen. Die Lösung wird an die Außenoberfläche transportiert, wo es durch die Verdunstung der Feuchtigkeit zur Kristallisation der Salze kommt. Auf diese Weise entstehen weiße bis schmutzig gelbe Ausblühungen oder Krustenbildungen an der Oberfläche. Das Herauslösen des Bindemittels führt zu einer Erhöhung der Porosität des Natursteins und zu einem Verlust seiner Festigkeit, der die Zerstörung seines Gefüges und die Aufhebung seiner statischen Funktion bewirken kann.

Treibender Angriff

Gelangt das gebildete Calciumsulfat (CaSO_4) durch Bindung von Feuchtigkeit bereits im Bauteil zur Auskristallisierung, bildet sich Gipsstein. ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)



Die Bindung von Kristallwasser führt bei der Bildung von Gips zu einer Volumenvergrößerung (Verhältnis 1 : 2), die zu einer Sprengung des Porengefüges des Natursteins führen kann. Die entstehenden Spannungen können zu Gesteinszerstörungen führen, die sich in Rissen und schalenförmigen oder punktuellen Abplatzungen an der Oberfläche zeigen können.

Kohlendioxid

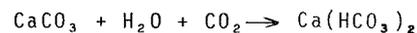
Eine geringere Bedeutung als der Langzeitverwitterung durch Schwefeldioxid kommt der Verwitterung der Natursteine durch kohlensäurehaltiges Wasser zu. Betroffen sind hiervon in erster Linie Sandsteine mit kalkhaltigen Binde-

mitteln und poröse Kalksteine. Weniger betroffen sind die dolomithaltigen Bindemittel in Sandsteinen und Kalksteinen.

Kohlensäurehaltiges Wasser entsteht in der Atmosphäre durch Regenwasser, welches CO_2 der Luft aufnimmt. Es kann auf kapillarem Weg in den porösen Naturstein eindringen.

Die Bildung von kohlensäurehaltigem Wasser ist ebenso bei gasförmigem Eintritt des CO_2 -Gehaltes der Luft in den Naturstein möglich, wenn CO_2 dort mit vorhandener Feuchtigkeit reagiert.

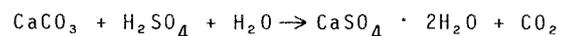
Die weltweite Zunahme der natürlichen CO_2 -Konzentration der Atmosphäre von 0,029 auf über 0,033 Vol.-% (in Industrielatmosphäre bis zu 0,1 Vol.-%), die vor allem auf die Verbrennung fossiler Brennstoffe zurückzuführen ist, erhöht den Kohlensäuregehalt des Regenwassers und beschleunigt somit den Verwitterungsprozeß. Die schädigende Wirkung des kohlensäurehaltigen Wassers geschieht durch das Lösen von Kalk nach folgender Reaktion:



Hierbei wird das schwerlösliche Bindemittel Calciumcarbonat (CaCO_3) in das sehr leicht lösliche Calciumhydrogencarbonat ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) überführt. Auf diese Weise kann das Bindemittel durch Feuchtigkeit leicht gelöst werden, und wird mit Hilfe physikalischer Transportmechanismen (Kapillarität, Osmose) im Natursteinmauerwerk transportiert, bis es sich durch Verdunstung der Feuchtigkeit an anderer Stelle im oder auf dem Naturstein (Ausblühungen) wieder als Calciumcarbonat absetzt.

Diese Einwirkung des kohlensäurehaltigen Wassers führt zu Bindemittelverlagerungen und damit zu Gefügezerstörungen innerhalb der Natursteine. Sie zeigt sich in Absanden, Krustenbildung, Absprengung, Ausblühung und/oder Bröckelzerfall.

Die Entstehung von kohlensäurehaltigem Wasser im Naturstein ist neben der direkten Einwirkung von CO_2 aus der Luft auch über die Entstehung von CO_2 aus sulfatbildenden Reaktionen möglich.



Da in beiden Fällen für das Entstehen bzw. für das schädigende Einwirken von kohlensäurehaltigem Wasser die Anwesenheit von Feuchtigkeit die

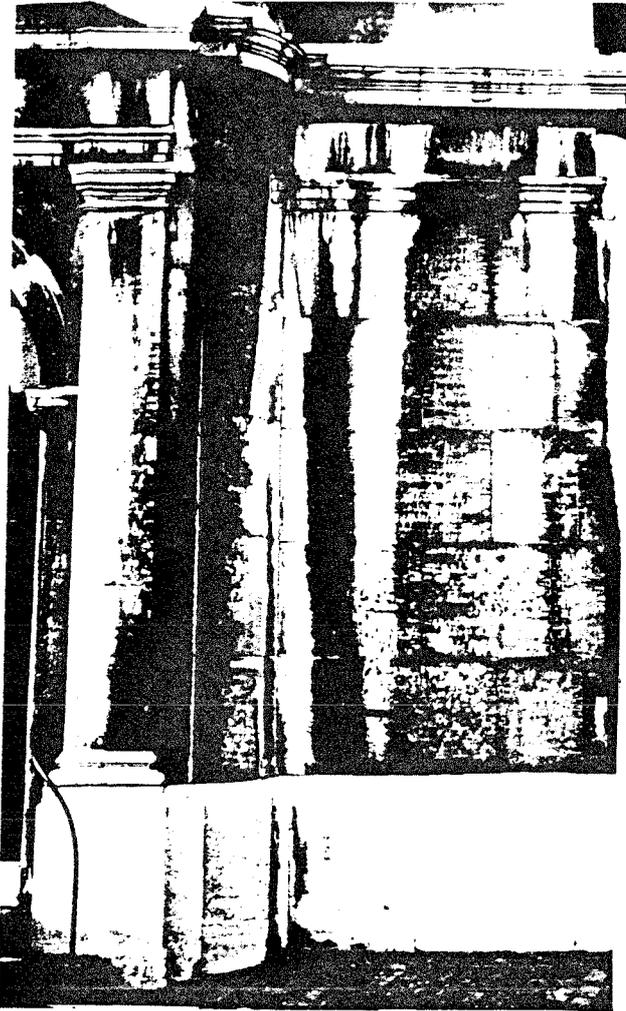


Abb. 3.5: Schmutzfahnen auf Natursteinfassade

Voraussetzung für die ablaufenden Reaktionen ist, zielen die Sanierungsmaßnahmen hier wie bei der Vermeidung von Sulfatreaktionen darauf ab, daß Eindringen von Feuchtigkeit in das Bauteil zu vermeiden.

Andere gasförmige Schadstoffe:

Ober die Auswirkungen der anderen Luftschadstoffe, z. B. Ozon, Chlorwasserstoff und vor allem der Stickoxide liegen keine Untersuchungen vor.

Partikelförmige Luftverunreinigungen

Partikelförmige Luftverunreinigungen in Form von Staub und Ruß bewirken ein Verschmutzen der Bauteiloberflächen. Das trifft besonders auf Oberflächen von Natursteinen zu, wie wir sie in den verschiedensten Arten und Formen an Gebäuden und Denkmälern vorfinden.

Die Verschmutzungen der Bauteiloberfläche, die besonders an der wettergeschützten Seite auftreten, zeigen im Laufe der Zeit ein Erscheinungsbild, das durch einen ungleichmäßigen Verschmutzungsgrad gekennzeichnet ist. Für die unregelmäßige Verschmutzung von Natursteinfassaden führen Sneathlage und Arendt (171) folgende Gründe auf:

- Unterschiedliche Regenexposition:
Dem Regen ausgesetzte Teile sind geringer verschmutzt als die geschützten.
- Ablaufendes Regenwasser:
An Fassaden oder Mauern ablaufendes Regenwasser kann entweder reinigen oder dunkle Schmutzfahnen ausbilden.
- Ungleichmäßige Oberflächenstruktur:
Rauhe Oberflächen verschmutzen leichter, weil der Schmutz besser haften kann. Die Rauigkeit kann sowohl eine naturgegebene Gesteinseigenschaft, eine gewollte steinmetzmäßige Bearbeitung oder inzwischen witterungsbedingt sein.
- Unterschiedliche mikroklimatische Bedingungen:
Unterschiedliche mikroklimatische Bedingungen führen zu einem unterschiedlichen Erhaltungs-

zustand einzelner Natursteinteile. Von Stein zu Stein wechselnde Materialfestigkeiten bewirken einen ungleichmäßigen Oberflächenverlust durch Absanden oder auch Abplatzen von Krusten.

- Steinaustausch:

Aufgrund von Natursteinauswechselungen bei früheren Restaurierungsmaßnahmen besitzen nicht alle Steine dieselbe Standzeit und deshalb auch nicht dieselbe Verschmutzung.

Verschmutzungen beeinträchtigen jedoch nicht nur das Erscheinungsbild von Natursteinfassaden und Natursteindenkmälern, sondern der in die Gesteinsporen eingedrungene Schmutz kann die Oberfläche verdichten und somit die Wasserdampfdiffusion beeinträchtigen. Durch Risse, Fugen u. ä. eingedrungenes Wasser kann unter Umständen nur sehr begrenzt wieder abgegeben werden.

Lösungs- und Auskristallisationsvorgänge erfolgen hinter einer dichten, harten Oberfläche, wo sie das Gestein zermürben. Die eingeschlossene Feuchtigkeit mindert ebenfalls die Frost-Tauwasser-Beständigkeit des Natursteins. Bröckelzerfall und Absprengungen können die Folgen solchen Einwirkens von Verschmutzungen sein.

Staubablagerungen wirken, wenn sie inert sind, als Wasserspeicher, können aber auch je nach Schadstoffgehalt und Feuchtigkeitsangebot als Katalysator bei der Bildung von Säuren oder selbst als ätzende Kompresse auf der Bauteiloberfläche wirken.

Die Möglichkeiten der schädigenden Wirkung von Verschmutzungen auf die Bausubstanz zeigen, daß sich eine „Patina“ schnell zu einer Schmutzansammlung entwickeln kann, die die Grundlage für spätere Schäden bildet.

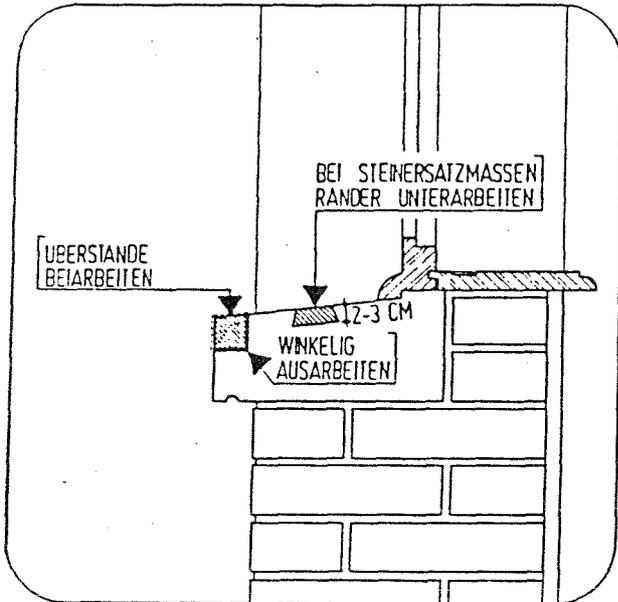
3.1.3 Nachbesserung

Abb. 3.6: Steinganzung

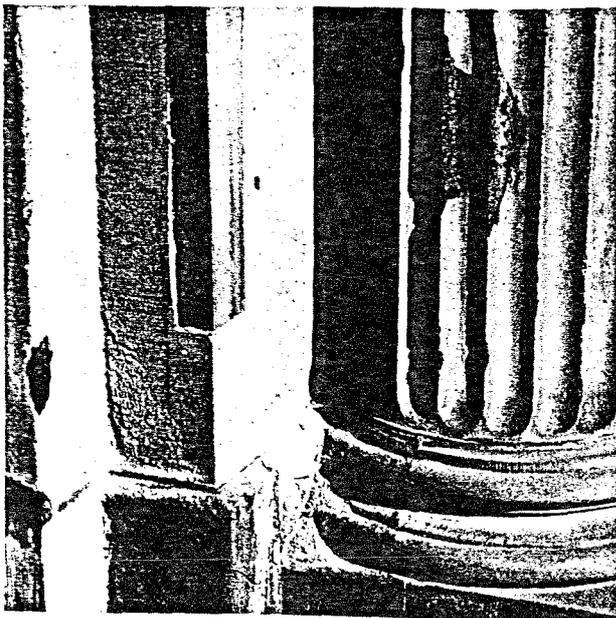


Abb. 3.7: Natursteinausbesserungen

Umfang und Form der auszuführenden Nachbesserungsarbeiten richten sich objektspezifisch nach dem Ausmaß der aufgetretenen Schäden, und sollen in einem ausgewogenen Verhältnis zur noch zu erwartenden Lebensdauer des Gesamtbauteils bzw. -gebäudes stehen.

Aus der Erkenntnis des Wirkungsmechanismus von Schwefeldioxid (SO_2) und Kohlendioxid (CO_2) auf Natursteine ergibt sich für die Nachbesserung die vordringliche Aufgabe, daß Eindringen von Feuchtigkeit in die Natursteinfassade zu verhindern. Damit können gleichzeitig mögliche chemische Reaktionen verhindert werden.

Neben einer unter Umständen notwendigen Trockenlegung des Mauerwerks werden folgende vorbeugende und konservierende Maßnahmen zur Erhaltung von Natursteindenkmälern und -gebäuden unterschieden:

- die Hydrophobierung, die das Eindringen von Regenwasser in die Natursteinfassade verhindert;
- die Steinverfestigung, die bei fortgeschrittener Gefügerstörung des Natursteins mittels chemischer Hilfsmittel eine Remineralisierung und Härtung des mürben Gesteins erzielen will;
- die Steinganzung, wodurch punktuelle Beschädigungen durch das Einsetzen von "Vierungen" bzw. die Verwendung von Steinersatzmassen meist eine kosmetische Nachbesserung erfahren;
- die Steinauswechslungen, die bei besonders starken Schädigungen des Natursteingefüges durch teilweise oder vollständige Steinauswechslungen die statische Sicherheit eines Gebäudes oder eines Denkmals wiederherstellen soll.

Bei der Anwendung chemischer Steinschutz- und Konservierungsmittel sind jedoch in der Vergangenheit eine Menge Probleme aufgetreten (zu geringe Eindringtiefe, diffusionsdichte Abdichtung, Veränderung der Steinfarbe etc.). Die Informationsstelle für Naturstein (17) warnt bei der Gebäudeerhaltung historischer Bauten aus diesem Grund vor der Anwendung dieser Mittel ohne genaue Untersuchung des Naturstein-

materials und ohne gründliche Kenntnisse der anzuwendenden Stoffe sowie deren Verarbeitungsvorschriften. Diese Erkenntnis bestätigt Luckat (190), der in seinen Untersuchungen feststellt, daß es bisher kein Universalmittel gibt, welches für alle Steinarten ein annehmbares Verhalten zeigt. Augenblicklich kommen die silicium-organischen Produkte, seien es nun Kieselsäureester, Siliconharze oder Silicone einem idealen Steinschutzpräparat am nächsten.

Die Beeinträchtigungen des Erscheinungsbildes durch partikelförmige Luftverunreinigungen machen zur Erhaltung der architektonischen und künstlerischen Aussagekraft bei der Vielfalt der verwendeten Steinarten und der Vielzahl der denkmalgeschützten Objekte ein auf das Einzelobjekt abgestimmte Reinigungsverfahren notwendig. Dabei ist auf eine besonders schonende Reinigung zu achten, um nicht durch das Reinigungsverfahren selbst einen möglichen Substanzverlust am angewitterten Naturstein zu erreichen. Die Reinigungsverfahren werden nach

- der Reinigung mit Wasser,
- der Reinigung mit mechanischen Hilfsmitteln und
- der Reinigung mit chemischen Hilfsmitteln

unterschieden.

3.1.4 Zusammenfassung

Zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen und Veröffentlichungen machen die Luftverunreinigung für die beschleunigte Beteiligung bei den in den letzten 70 Jahren progressiv steigenden Verwitterungserscheinungen an kulturhistorischen Gebäuden und Denkmälern aus Natursteinen verantwortlich. Die durch die Luftverunreinigungen aufgetretenen Schäden, die ein ähnliches Erscheinungsbild aufweisen wie die Verwitterungserscheinungen an Natursteinen, zeigen sich in Schadensformen wie Absanden, Schalenbildung, Krustenbildung, Absprengungen, Ausblühungen, Bröckelzerfall u. a. Diese Gefügezerstörungen können ein Ausmaß annehmen, das in Einzelfällen die statische Funktion eines Bauteils bzw. eines Bauwerks in Frage stellt.

Die Vielzahl der an kulturhistorischen Gebäuden, Ornamenten und Denkmälern entstandenen Schäden machen umfangreiche Restaurierungsmaßnahmen mit tendenziell steigenden Kosten notwendig. Besonders betroffen sind Natursteine mit porösem Gefüge und kalk- bzw. dolomithaltigen Bindemitteln. In Feuchtigkeit gelöste Schadstoffe lösen die Bindemittel und waschen sie aus.

Über die schädigende Einwirkung der aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehenden Schadstoffe Schwefeldioxid (SO_2) und Kohlendioxid (CO_2) liegen gesicherte Erkenntnisse vor, während das Einwirken anderer Schadstoffe auf Natursteine vor allem der Stickoxide bisher noch nicht näher untersucht worden ist.

Partikelförmige Luftverunreinigungen in Form von Staub und Ruß stellen nicht nur eine Beeinträchtigung des Erscheinungsbildes dar, sondern können, besonders an der schlagregenabgewandten Seite, wo sie durch den Regen weniger abgewaschen werden, die poröse Oberfläche von Natursteinen verdichten und somit die Wasserdampfdiffusion behindern.

Eine genaue Bewertung der durch partikelförmige Luftverunreinigungen, Schwefeldioxid und Kohlendioxid entstandenen Schäden ist bei den Natursteinen nur schwer möglich, weil sich natürliche Verwitterungserscheinungen mit schadstoffbedingten Alterungen überdecken. Eine Beteiligung der Schadstoffe am Verwitterungsprozeß ist jedoch nachgewiesen, so daß umfangreiche Restaurierungsmaßnahmen und ein erhöhter Reinigungsaufwand notwendig werden, um die Bausubstanz kulturhistorischer Güter weiterhin zu erhalten.

3.2 Beton und Stahlbeton



Abb. 3.8: Rostabsprengung und beginnende Abplatzungen an Sichtbetonfassade

Außenbauteile aus Beton und Stahlbeton besitzen in der weitausüberwiegenden Zahl ihrer Anwendungen auch ohne einen Oberflächenschutz eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber biologischen, chemischen und physikalischen Beanspruchungen.

Die durch die luftverunreinigenden Stoffe veränderten Umweltbedingungen beanspruchen heute auch die Bauteile aus Beton und Stahlbeton stärker als in der Vergangenheit. Dies trifft besonders auf feingliederige Fassaden- und Konstruktionselemente aus Sichtbeton zu. Die Erfahrungen der letzten Jahre haben gezeigt, daß an Außenbauteilen aus Beton, die den Witterungseinflüssen ausgesetzt sind, gehäuft Mängel auftreten, bei denen in der Schadensanalyse eine Beteiligung der luftverunreinigenden Schadstoffe Kohlendioxid (CO_2), Schwefeldioxid (SO_2) und Staub festgestellt wurden.

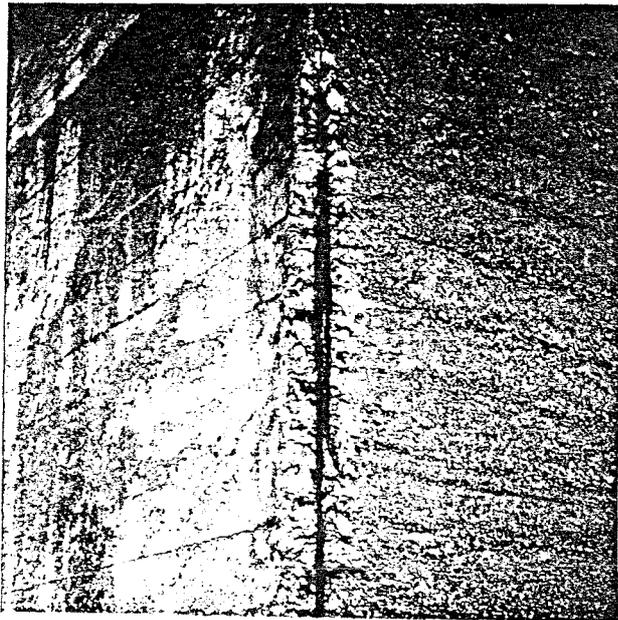


Abb. 3.9: Betonabsprengung im Eckbereich

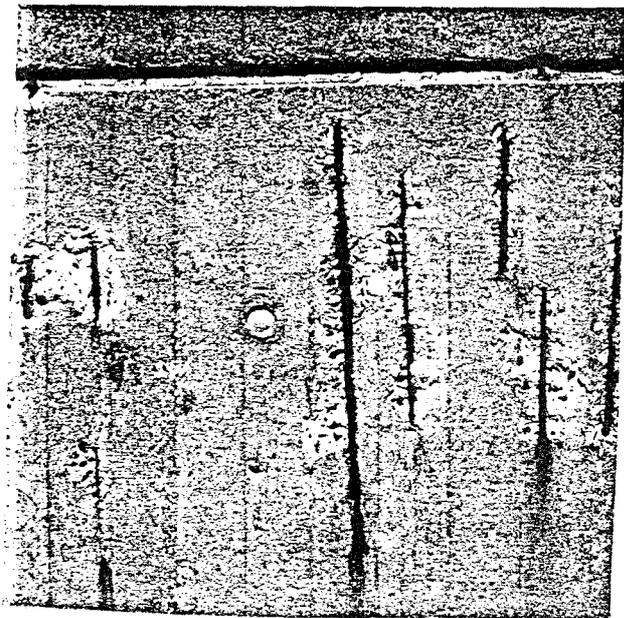


Abb. 3.10: Rostabsprengung bei geringer Betonüberdeckung

3.2.1 Erscheinungsbilder

Die aufgrund des Einwirkens von Luftverunreinigungen entstehenden Schäden an Bauteilen aus Beton und Stahlbeton können folgende Erscheinungsbilder aufweisen:

An der Oberfläche von dünnwandigen Fassadenelementen und feingliederigen Konstruktionselementen sind Rostläufer erkennbar, die den Verlauf der Bewehrung anzeigen. Infolge zunehmender Korrosion führt die Volumenvergrößerung der Bewehrung oft erst Jahre nach der Fertigstellung des Betonbauteils zu Absprengungen der Betonüberdeckung und legt die Bewehrung frei. Weiterer Korrosionsfortschritt kann zu einer Beeinträchtigung der Tragfähigkeit der Konstruktion führen.

An der Betonoberfläche zeigen sich Treibrisse oder schalenförmige Abplatzungen, die infolge der Sprengwirkung von sulfathaltigen Verbindungen aufgetreten sind.

Unbehandelte Sichtbetonoberflächen weisen starke, unregelmäßige Verschmutzungen auf. Der in ablaufendem Regenwasser gelöste Schmutz hinterläßt deutliche, dunkle Schmutzfahnen und Ablaufspuren.

An der Oberfläche von Sichtbetonfassaden zeigen sich Ausblühungen und Aussinterungen in Form weiß-gelber Fahnen und Krusten.

3.2.2 Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen

Die Analyse der beschriebenen Schäden an Außenbauteilen aus Beton- und Stahlbeton weist auf eine Beteiligung von Schadstoffen aus der Luft bei der Schadensursache hin. In der Literatur werden hier in erster Linie Kohlendioxid (CO₂), Schwefeldioxid (SO₂) und Staub genannt, deren schädigende Wirkungsmechanismen aufgezeigt werden sollen.

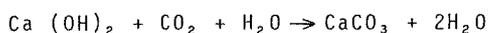
Kohlendioxid

Kohlendioxid CO₂ ist mit 0,029 Vol.-% natürlicher Bestandteil der Luft und zählt somit zu den natürlichen Umweltbedingungen, denen ein Bauteil ausgesetzt ist. Erst der über diesem Prozentsatz hinausgehende, aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehende CO₂-Gehalt der Luft kann daher als Schadstoff angesehen werden. Der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre wird heute mit 0,033 Vol.-% angegeben, wobei die Werte lokal starken Schwankungen unterworfen sind und in Industrielatmosphäre bis zu 0,1 Vol.-% betragen können.

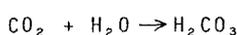
Kohlendioxid (CO₂) gelangt über verschiedene physikalische Wege in die feinen Poren des erhärteten Zementsteins,

- kapillar, als in (Regen)Wasser gelöste Flüssigkeit (Kohlensäure, (H₂CO₃)).
- gasförmig über die Diffusion.

In beiden Fällen reagiert Kohlendioxid (CO₂) dort bei Anwesenheit von Feuchtigkeit mit dem Calciumhydroxid (Ca(OH)₂) des Betons zu Calciumcarbonat. (CaCO₃).



Dieser chemische Vorgang wird als Carbonatisierung bezeichnet. Sie schreitet von der Außenoberfläche ins Bauteilinnere fort, wobei die Kohlensäure (H₂CO₃)



den pH-Wert von 12,6 des alkalischen Porenwassers senkt.

Der Carbonatisierungsfortschritt ist vom Angebot des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre abhängig und bei einer relativen Luftfeuchte zwischen 50

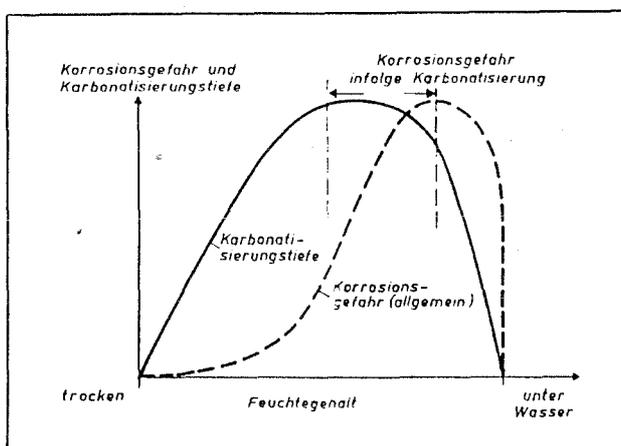


Abb. 3.11: Korrosionsgefahr und Karbonatisierungstiefe (aus: Wesche, 83).

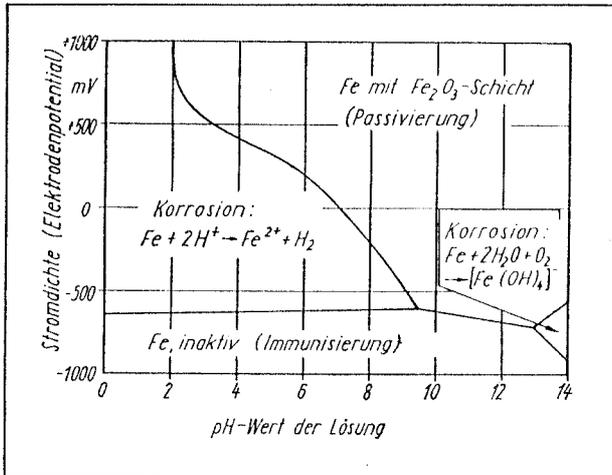


Abb. 3.12: Abhängigkeit des Elektrodenpotentials vom pH-Wert bei Eisen (nach Pourbaix) (aus: Knöfel, 55).

und 70 % am größten.

Völlige Wasserlagerung oder völliges Fernhalten von Feuchtigkeit können den Carbonatisierungsfortschritt bremsen (Abb.3.11). Das bedeutet, daß Betonbauteile, die dem Niederschlag ausgesetzt sind, langsamer carbonatisieren als Bauteile im Freien, die vor Niederschlägen geschützt sind. Die bei Niederschlägen aufgenommene Feuchtigkeit muß vor dem weiteren Carbonatisieren erst austrocknen.

Bedeutung kommt der Carbonatisierung bei Stahlbetonbauteilen zu, wenn die Carbonatisierungsfrent die Bewehrung erreicht und den pH-Wert unter 9,5 senkt (Abb. 3.12). Die im basischen Milieu durch eine lückenlose Schutzschicht aus Eisenoxiden und -hydroxiden vor Korrosion geschützte Bewehrung verliert ihren Korrosionsschutz und der Stahl beginnt unter Beteiligung von Sauerstoff und Feuchtigkeit zu rosten. Es ist deshalb darauf zu achten, daß die Betonüberdeckung größer ist als die zu erwartende Carbonatisierungstiefe. Dichtigkeit, Güte (Abb. 3.13) und Nachbehandlung des Betons beeinflussen den Carbonatisierungsfortschritt.

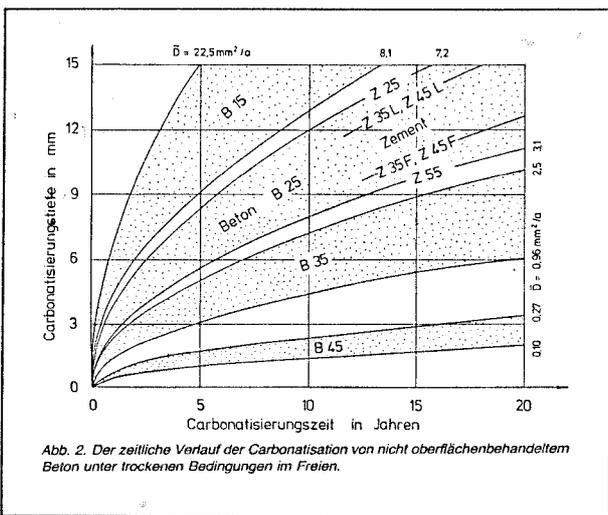


Abb. 2. Der zeitliche Verlauf der Carbonatisierung von nicht oberflächenbehandeltem Beton unter trockenen Bedingungen im Freien.

Abb. 3.13: Der zeitliche Verlauf der Carbonatisierung von nicht oberflächenbehandeltem Beton unter trockenen Bedingungen im Freien (aus: Klopfer, 129).

In der Vergangenheit wurde der Carbonatisierung zu wenig Bedeutung beigemessen. Schadensbeispiele zeigen, daß vor allem an dünnwandigen und feingliedrigen Sichtbetonbauteilen die Carbonatisierungsfrent aufgrund zu geringer Betonüberdeckung die Bewehrung erreichen kann. Kommt es nun zur Korrosion der Bewehrung, so tritt neben dem Festigkeitsverlust eine Volumenzunahme ein, die ein Absprengen des Betons vor der Bewehrung verursachen kann. Solche Schäden sind oft erst Jahre nach der Fertigstellung des Bauteils zu beobachten.

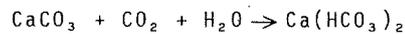
Schwachstellen in Betonbauteilen wie Kiesnester, Lunker oder Risse begünstigen den Zutritt von CO_2 und beschleunigen an diesen Stellen die Carbonatisierung. Der Carbonatisierungsfortschritt verläuft nicht mehr parallel zur Betonoberfläche, sondern weist Carbonatisierungsspitzen auf. An diesen Stellen kommt es zur örtlichen Aufhebung der Passivierung des Stahls, was beim Zutritt von Sauerstoff und Feuchtigkeit zu lokaler Korrosion der Bewehrung mit ihren Folgen führen kann.

Als noch unbedenklich für die Bewehrungskorrosion werden von Knöfel (55) nachstehende Ribbreiten eingestuft:

0,3 mm	in trockenen Räumen
0,2 mm	bei Bauwerken im Freien
0,1 mm	bei stark korrosionsfördernden Verhältnissen.

Die gestiegene CO_2 -Konzentration der Luft bewirkt bei sonst gleichbleibenden Randbedingungen eine Beschleunigung der Carbonatisierung. Dies führt zu einem früheren Auftreten möglicher Schäden, vornehmlich an den beschriebenen Schwachstellen.

Eine weitere Schädigung kann durch das Einwirken von CO_2 und Feuchtigkeit entstehen, wenn das durch die Carbonatisierung entstehende, schwerlösliche Bindemittel Calciumcarbonat (CaCO_3) durch weiteres Einwirken von Kohlensäure (H_2CO_3) zur Bildung des leichtlöslichen Calciumhydrogencarbonats ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) führt.



Das leichtlösliche Ca-hydrogencarbonat kann durch Feuchtigkeitstransport (Kapillarität) ausgewaschen werden. So kommt es aufgrund des Bindemittelverlustes zur Verringerung der Bauteilfestigkeit und an der Oberfläche von Sichtbetonfassaden nach einer Verdunstung der Feuchtigkeit zu Kalkaussinterungen.

Bisher ist es noch nicht gelungen, das Ausmaß der Schäden an Betonbauteilen, die auf den gestiegenen CO_2 -Gehalt der Luft zurückgeführt werden, zu erfassen, weil:

- die CO_2 -Konzentration örtlich sehr verschieden sein kann,
- die Schädigung im Zusammenhang mit anderen Schwachstellen (Planungs- und Ausführungsfehler) auftreten,
- die Aufnahme von CO_2 von der Exposition des Bauteils, der Porosität, der Betongüte, der Oberflächenbeschichtung und der Oberflächenstruktur abhängt,
- die Schäden nicht alle sichtbar werden, (z.B. an Stahlbetonbauteilen mit hinterlüfteter Vorhangsfassade).

Erkenntnisse der Betontechnologie haben dazu geführt, Maßnahmen zu ergreifen, um den Schäden, die durch die Carbonatisierung begünstigt werden, vorzubeugen. Hier ist, neben konstruktiven Maßnahmen wie das Vermeiden sehr feingliedriger Bauteile, Abdichten von Fugen und Abschließen

der Betonoberfläche, die Erhöhung der Betonüberdeckung zu nennen, der in Vergangenheit zu wenig Beachtung geschenkt wurde. So wurden die Mindestanforderungen an die Betonüberdeckung mehrmals heraufgesetzt, zuletzt 1978 in der jetzt gültigen Fassung der DIN 1045.

Selbst diese Werte gelten heute als nicht mehr ganz ausreichend, was den Deutschen Ausschuß für Stahlbeton im Dezember 1981 veranlaßte, "Empfehlungen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Außenbauteilen aus Stahlbeton" (14) zu formulieren. Danach ist das Mindestmaß der Betondeckung auf den Bewehrungszeichnungen gegenüber den Mindestmaßnahmen gemäß DIN 1045, Tabelle 10 um einen Sicherheitszuschlag von 1,0 cm zu erhöhen.

Ob diese Bemühungen jedoch ausreichen, um die beschriebenen Schäden in Zukunft zu vermeiden, wird augenblicklich in Fachkreisen kontrovers diskutiert.

Schwefeldioxid

Der in der verunreinigten Atmosphäre enthaltene gasförmige Schadstoff Schwefeldioxid (SO_2) gilt als der wichtigste Indikator für den Grad der Luftverunreinigung.

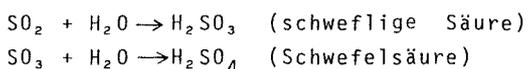
Die Aufnahme des Schadstoffs erfolgt über verschiedene physikalische Wege, wobei nach

- nasser Deposition und
- trockener Deposition

unterschieden werden kann.

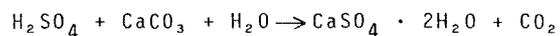
Bei der nassen Deposition erfolgt die Schadstoffaufnahme kapillar. Hierbei dringt das in der Atmosphäre mit Feuchtigkeit reagierende Schwefeldioxid (SO_2) als schweflige Säure (H_2SO_3), oder stärker konzentriert als Schwefelsäure (H_2SO_4) in den Beton ein.

Bei der trockenen Deposition erfolgt die Aufnahme von SO_2 über die Diffusion und erst die chemische Reaktion mit Feuchtigkeit im Bauteil führt zur Bildung der schwefligen Säure bzw. der Schwefelsäure. Die Reaktionen erfolgen nach folgenden Gleichungen:



In beiden Fällen ist das Vorhandensein von Feuchtigkeit, sei es bereits vor dem Bauteil (Regen, Tau, Nebel) oder im Bauteil selber, die Voraussetzung für die Umwandlung von SO_2 in die aggressiven Medien der schwefligen Säure bzw. nachdem SO_2 an der Atmosphäre zu SO_3 aufoxidiert ist, in die Schwefelsäure.

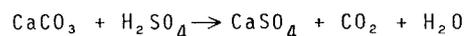
Die schädigende Einwirkung der schwefelhaltigen Verbindungen auf Bauteile aus Beton und Stahlbeton erfolgt durch die Bildung von Gips, wobei das schwerlösliche Bindemittel Calciumcarbonat (CaCO_3) durch Reaktion mit Schwefelsäure (H_2SO_4) und Feuchtigkeit (H_2O) in das leichtlösliche Calciumsulfat-Dihydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Gips) überführt wird.



Die Bildung von Gips führt zu zwei verschiedenen, sich überlagernden Angriffsformen:

- Lösender Angriff

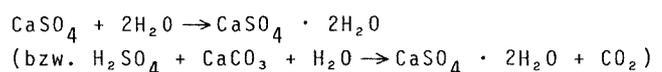
Beim lösenden Angriff erfolgt die Art der Schädigung durch das Herauslösen des Bindemittels in Form des Abführens von in Lösung bleibenden Reaktionsprodukten mit Wasser nach folgender Reaktionsgleichung:



Hierbei wird das schwerlösliche Bindemittel Calciumcarbonat (CaCO_3) durch den Angriff der Schwefelsäure (H_2SO_4) in das leichtlösliche Calciumsulfat (CaSO_4) umgewandelt und bei der Anwesenheit von Wasser ausgewaschen. Die Folgen des lösenden Angriffs sind Festigkeitsabnahme und eine zunehmende Undichtigkeit des Betons. An die Außenoberfläche transportiert, kann sich die Lösung nach dem Verdunsten der Feuchtigkeit wieder als Calciumcarbonat (CaCO_3) zeigen (Aussinterungen).

- Treibender Angriff

Gelangt das gebildete Calciumsulfat (CaSO_4) durch Bindung von Feuchtigkeit zur Auskristallisation, bildet sich Gipsstein ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).



Die Bindung von Kristallwasser führt bei der Bildung von Gips zu einer Volumenvergrößerung (Verhältnis 1 : 2), die zu einer Sprengung des Betongefüges führt. Es zeigen sich Treibrisse oder schalenförmige Abplatzungen an der Betonoberfläche.

Saure Atmosphärien, wie die schweflige Säure bzw. die Schwefelsäure, tragen durch das bei den Sulfatreaktionen freiwerdende CO_2 zur Neutralisation des alkalischen Milieus im Beton bei und beschleunigen somit den Carbonatisierungsvorgang.

Bisher ist es nicht möglich gewesen, daß Ausmaß der schädigenden Auswirkungen der SO_2 -Gehaltes der Atmosphäre auf Bauteile aus Beton und Stahlbeton zu bestimmen. Das Ausmaß hängt ab von

- den Schwachstellen des Bauteils,
- dem Zusammenwirken von SO_2 mit anderen Schadstoffen und Umwelteinflüssen,
- der SO_2 -Konzentration der Atmosphäre und
- der Aufnahme durch den Beton.

Auch in der DIN 4030, Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase (4) fehlt ein Kriterium, zur Beurteilung des Einwirkens schädlicher Gase, so daß hiernach eine unter Umständen mögliche Grenzwertbestimmung über das schädigende Einwirken von SO_2 und anderen Gasen auch nicht möglich ist.

Partikelförmige Luftverunreinigungen

Partikelförmige Luftverunreinigungen in Form von Staub und Ruß bewirken ein Verschmutzen der ihnen ausgesetzten Bauteiloberfläche. Dies trifft auch auf Oberflächen aus Sichtbeton zu. Die Verschmutzungen der Bauteiloberfläche, die oft besonders deutlich an der regen- und windabgewandten Seite zu beobachten sind, zeigen mit den Jahren ein Erscheinungsbild, daß durch einen unregelmäßigen Verschmutzungsgrad gekennzeichnet ist. So wechseln saubere und stark verschmutzte Fassadenbereiche ineinander über und können über die Aufhebung der baulichen Gliederung eines Gebäudes zu starken Beeinträchtigungen des Erscheinungsbildes führen. Besonders die in Regenwasser gelösten Schmutzpartikel hinterlassen deutlich erkennbare Fließbahnen. Auf hellen Betonfassaden, bei denen Staub und Ruß aufgrund

der kapillaren Wasseraufnahme im Porensystem gut haften bleiben, werden die Schmutzablagerungen besonders deutlich sichtbar.

Für die unregelmäßige Verschmutzung von Fassaden aus Sichtbeton können in Anlehnung an die Aussagen von Snethlage und Arendt (171) zu den Natursteinen folgende Gründe aufgeführt werden:

- Unterschiedliche Regenexposition:
Dem Regen ausgesetzte Teile sind geringer verschmutzt als die geschützten.
- Ablaufendes Regenwasser:
An Fassaden oder Mauern ablaufendes Regenwasser kann entweder reinigen oder dunkle Schmutzfahnen ausbilden.
- Ungleichmäßige Oberflächenstruktur:
Rauhe Oberflächen verschmutzen leichter, weil der Schmutz besser haften kann.
- Unterschiedliche mikroklimatische Bedingungen:
Unterschiedliche mikroklimatische Bedingungen führen zu einem unterschiedlichen Erhaltungszustand einzelner Fassadenteile.

Um einen aus der Verschmutzung resultierenden erhöhten Reinigungsaufwand zu vermeiden, werden als Vorbeugung gegenüber starken Verschmutzungen von Sichtbetonfassaden oft farblose Imprägnierungen auf Silikat,- Siloxan- oder Silanbasis empfohlen.

Schadensbeispiele bestehender stark verschmutzter Sichtbetonfassaden weisen daraufhin, daß sich entstehende Schmutzfahnen konstruktiv durch die Ausbildung von Tropfkanten verhindern lassen. Eine Beeinträchtigung des Langzeitverhaltens von Sichtbetonfassaden durch partikelförmige Luftverunreinigungen ist bisher nicht festgestellt worden.

Eine schädigende Wirkung auf die Bausubstanz kann vom Staub ausgehen, wenn die Ablagerungen auf Betonoberflächen gasförmige Luftverunreinigungen adsorbieren. Die Staubablagerung kann dann je nach Schadstoffgehalt und Feuchtigkeitsangebot als Katalysator bei der Bildung von Säuren oder als ätzende Kompressen auf der Bauteiloberfläche wirken. Das Ausmaß dieser Schädigungsmöglichkeit auf Sichtbetonfassaden ist bisher nicht abgeschätzt worden.



Abb. 3.14: Ausbesserung von Schäden durch Rostabsprengung

3.2.3 Nachbesserung

Umfang und Form der auszuführenden Nachbesserungsarbeiten richten sich objektspezifisch nach dem Ausmaß der aufgetretenen Schäden, und sollen in einem ausgewogenen Verhältnis zur noch zu erwartenden Lebensdauer des Gesamtbauteils bzw. -gebäudes stehen.

Aus der Erkenntnis des Wirkungsmechanismus von Schwefeldioxid (SO_2) und Kohlendioxid (CO_2) auf Bauteile aus Beton und Stahlbeton ergibt sich für die Nachbesserung die vordringliche Aufgabe, daß Eindringen von Feuchtigkeit in den Beton zu verhindern. Damit können gleichzeitig die chemischen Reaktionen verhindert werden.

Die Sanierungsmaßnahmen an beschädigten Bauteilen aus Stahlbeton sind in ihrem Umfang vom Ausmaß der Schäden bzw. der noch zu erwartenden Schäden abhängig und haben das Ziel:

- eine ausreichende Betonüberdeckung wieder herzustellen,
- den Feuchtigkeitszutritt und/oder
- den CO_2 -Zutritt zu vermeiden.

Folgende Verfahren kommen für die Sanierung in Frage:

- Sanierung der Betonoberfläche mit Spritzbeton
- Ausbessern vereinzelter Fehlstellen mit Kunstharz- oder mineralischen Mörteln
- Kunstharzbeschichtungen
- Hydrophobierende Imprägnierungen.

Von den geeigneten Sanierungsverfahren ist das auszuwählen, welches die Wiederherstellung der Standfestigkeit sowie die Nutzungsdauer für die vorgesehene Restnutzungszeit gewährleistet.

Die durch partikelförmige Luftverunreinigungen entstehenden Verschmutzungen der Fassadenoberfläche aus Beton machen einen erhöhten Reinigungsaufwand notwendig, wobei je nach Verschmutzungsgrad aufwendige Reinigungsmaßnahmen erforderlich sein können. Die Reinigungsverfahren werden nach

- der Reinigung mit Wasser,
- mechanischen Reinigungsverfahren und
- chemischen Reinigungsverfahren

unterschieden.

Neben der Erhaltung des Erscheinungsbildes schützt die Reinigung der Fassade vor möglichen Folgeschäden, die von Staubablagerungen ausgehen können.

3.2.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß Bauteile aus Beton- und Stahlbeton neben ihrer bekannten hohen Witterungsbeständigkeit, auch gegenüber luftverunreinigenden Schadstoffen, eine hohe Widerstandsfähigkeit besitzen. Eine schädigende Wirkung der sauren Atmosphärien Schwefeldioxid (SO_2) und Kohlendioxid (CO_2) konnte bisher in der Regel nur im Zusammenhang mit anderen Planungs- und ausführungstechnischen Schwachstellen festgestellt werden. Als ein deutlicher Schwachpunkt hat sich bei der Analyse der auftretenden Schäden die mangelnde Betonüberdeckung (besonders an feingliedrigen Fassaden- und Konstruktionselementen aus Sichtbeton) erwiesen. Die mangelnde Betonüberdeckung führt dazu, daß an diesen Stellen die Bewehrung bereits nach kürzerer Einwirkung von Kohlendioxid (CO_2) und Schwefeldioxid (SO_2) in der carbonatisierten Zone liegt. Bei Anwesenheit von Sauerstoff und Feuchtigkeit kommt es zur Korrosion der eingelagerten Bewehrung, die dann aufgrund einer Volumenzunahme zu Rissen und Abplatzungen der Betonoberfläche führt. Diese Schäden machen umfangreiche Sanierungsmaßnahmen nötig.

Die Erfahrung aus diesen in der Vergangenheit gehäuft auftretenden Bauschäden lehrt, daß feingliedrige Konstruktionen aus Stahlbeton, bei denen die vorgeschriebene Betonüberdeckung ausführungstechnisch nicht eingehalten werden kann, nicht baustoffgerecht sind, und vom planenden Architekten vermieden werden sollten.

Die in der Fachdiskussion geforderte Erhöhung der Anforderungen an die Betonüberdeckung nach DIN 1045 kann dazu beitragen, die Widerstandsfähigkeit von Betonbauteilen gegenüber den gestiegenen Beanspruchungen durch Luftverunreinigungen zu erhöhen. So ist augenblicklich bei regel- und baustoffgerechter Anwendung aufgrund saurer Atmosphärien keine Beeinträchtigung des Langzeitverhaltens von Betonbauteilen im Hochbau zu erwarten.

3.3 Mörtel und Putze

Putze an der Außenoberfläche von Außenbauteilen und Mörtel in den Fugen von Sichtmauerwerken sind direkt der Atmosphäre ausgesetzt. Besonders die auf Mauersteinen oder Beton aufgetragenen behandelten oder unbehandelten Putze dienen mit ihrer möglichen Struktur- und Farbenvielfalt der Oberflächengestaltung eines Bauwerks. Sie übernehmen zusätzlich "... je nach den Eigenschaften der verwendeten Mörtel bzw. Beschichtungsstoffe und der Dicke des Belages bestimmte bauphysikalische Aufgaben," (DIN 18 550, 6). Dazu zählt in der Regel vor allem die Schlagregenschutzfunktion, in den letzten Jahren vermehrt auch die Wärmeschutzfunktion.

Durch ihre Verwendung an Außenbauteilen werden Mörtel und Putze unmittelbar von Luftverunreinigungen angegriffen, was zu Schäden unterschiedlicher Art bei unbeschichteten oder beschichteten Putzoberflächen führen kann.

3.3.1 Mörtel und Putze mit unbehandelten Oberflächen

Auf Schäden an Mörteln und Putzen mit unbehandelter Oberfläche, die sich bei der Schadensanalyse auf Schadstoffe der Luft zurückführen lassen, wird in der Fachliteratur nur sehr vereinzelt hingewiesen. Dies gilt besonders für Putze mit organischen Bindemitteln (Kunstharzputze). Hier sind bisher mit Ausnahme der zunehmenden Verschmutzung der Oberfläche durch partikelförmige Luftverunreinigungen noch keine schädigenden Wirkungen der Schadstoffe bekannt geworden. An dieser Stelle erscheint es jedoch erforderlich zu überprüfen, inwieweit sich Untersuchungen über das schädigende Einwirken von Luftverunreinigungen (z. B. Schwefeldioxid, Ozon) auf andere organische Baustoffe auf Kunstharzputze übertragen lassen.

Bei den Putzen mit mineralischen Bindemitteln wird in der Literatur die schädigende Wirkung von Schwefeldioxid (SO_2) beschrieben, wobei das schädigende Einwirken mit dem bei anderen mineralischen Baustoffen vergleichbar ist. Der gestiegene CO_2 -Gehalt der Atmosphäre ist aufgrund der in der Regel nicht vorhandenen Stahlbewehrung bei Putzen und Mörteln bisher nicht als Wegbereiter möglicher schädigender Einwirkung in Erscheinung getreten.

Über die anderen Schadstoffe der Luft (Stickoxide, Ammoniak, Chlor/Chlorwasserstoff...) liegen bezüglich der Mörtel und Putze bisher keine Erkenntnisse vor.

3.3.1.1 Erscheinungsbilder

Abb. 3.15: Ungleichmäßige Verschmutzung einer Putzfassade

Die aufgrund des Einwirkens von Luftverunreinigungen entstehenden Schäden an unbehandelten Mörteln und Putzen können folgende Erscheinungsbilder aufweisen:

An verputzten Fassadenoberflächen entstehen Risse und schalenförmige Abplatzungen, die auf eine treibende, zerstörende Einwirkung von Schwefeldioxid (SO_2) hinweisen.

Schmutzig-weiße bis schmutzig-gelbe Ausblühungen oder Krustenbildungen an der Oberfläche einer Putzfassade, bzw. aus der Mörtelfuge von Sichtmauerwerk stammend, weisen auf die lösende, zerstörende Einwirkung von Schwefeldioxid (SO_2) hin.

Die verputzten Fassaden weisen bereits kurz nach ihrer Herstellung starke Verschmutzungen auf, die zu einer deutlichen Abweichung des ursprünglichen Erscheinungsbildes führen. Besonders ablaufendes Regenwasser hinterläßt deutlich sichtbare Fließbahnen. Die Verschmutzungen können aufgrund der standortbedingten Luftverunreinigungen sehr unterschiedlich sein, und sind oft auf der schlagregenabgewandten Seite verstärkt zu beobachten.

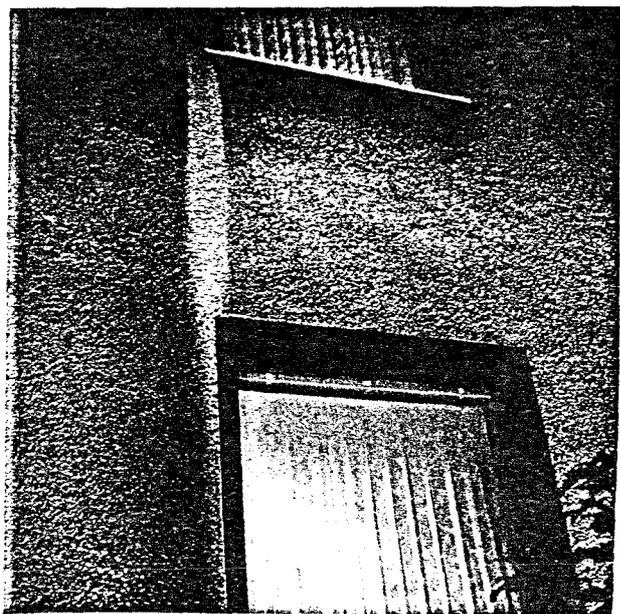


Abb. 3.16: Fließbahnen durch ablaufendes Regenwasser

3.3.1.2 Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen

Von den luftverunreinigenden Stoffen, die schädigende Auswirkungen auf Mörtel und mineralische Putze mit unbehandelter Oberfläche haben, werden in der Fachliteratur Schwefeldioxid (SO₂) und partikelförmige Luftverunreinigungen genannt. Ihr Wirkungsmechanismus soll beschrieben werden.

Schwefeldioxid

Der in der verunreinigten Atmosphäre enthaltene gasförmige Schadstoff Schwefeldioxid (SO₂) gilt als der wichtigste Indikator für den Grad der Luftverunreinigung.

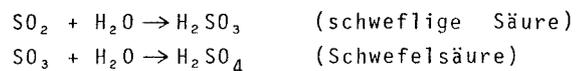
Die Aufnahme des Schadstoffs erfolgt über verschiedene physikalische Wege, wobei nach

- nasser Deposition und
- trockener Deposition

unterschieden werden kann.

Bei der nassen Deposition erfolgt die Schadstoffaufnahme kapillar. Hierbei dringt das in der Atmosphäre mit Feuchtigkeit reagierende Schwefeldioxid (SO₂) als schweflige Säure (H₂SO₃), oder stärker konzentriert als Schwefelsäure (H₂SO₄) in den Mörtel oder den Putz ein.

Bei der trockenen Deposition erfolgt die Aufnahme von SO₂ über die Diffusion und erst die chemische Reaktion mit Feuchtigkeit im Bauteil führt zur Bildung der schwefligen Säure bzw. der Schwefelsäure. Die Reaktionen erfolgen nach folgenden Gleichungen:



In beiden Fällen ist das Vorhandensein von Feuchtigkeit, sei es bereits vor dem Bauteil (Regen, Tau, Nebel) oder im Bauteil selber, die Voraussetzung für die Umwandlung von SO₂ in die aggressiven Medien der schwefligen Säure bzw., nachdem SO₂ an der Atmosphäre zu SO₃ oxidiert ist, in die Schwefelsäure.

Die Menge der Schadstoffaufnahme sollte in Anlehnung an Luckats Überlegungen, wie bei allen mineralischen Baustoffen, durch eine Immissionsrate bestimmt werden. Sie ist die von einer Flächeneinheit in einer Zeiteinheit aufgenommene Schadstoffmenge.

Somit sind neben dem Grad der Luftverunreinigung durch SO_2 bei den Mörteln und Putzen die baustoffspezifischen Kenngrößen

- Porosität
- Art der Oberflächenstruktur
- Art der Oberflächenbeschichtung sowie
- die Exposition des Bauteils

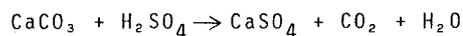
die Einflußgrößen, die die Schadstoffaufnahme und damit die schädigende Wirkung von SO_2 bestimmen.

Im Bauteil selbst können sich die Säuren durch Kapillarität und Osmose verteilen, so daß sich bei Putzoberflächen nicht nur örtlich begrenzte Schädigungen (z. B. an Schwachstellen) zeigen, sondern die schädigende Wirkung großflächig auftreten kann.

Bei den Putzen mit kalkhaltigen Bindemitteln (mineralische Putze der Putzmörtelgruppe PI, PII und PIII nach DIN 18 550, 6) erfolgt die schädigende Wirkung von SO_2 durch die Bildung von Gips, die zu zwei verschiedenen, sich überlagernden Angriffsformen führt:

- Lösender Angriff

Beim lösenden Angriff von SO_2 auf den erhärteten Putz erfolgt die Schädigung durch Herauslösen des Bindemittels durch Abführen von in Lösung bleibenden Reaktionsprodukten mit Wasser nach folgender Reaktionsgleichung:

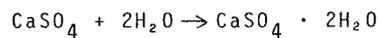


Hierbei wird das schwerlösliche Bindemittel Calciumcarbonat (CaCO_3) durch den Angriff der Schwefelsäure (H_2SO_4) in das leichtlösliche Calciumsulfat (CaSO_4) umgewandelt, und bei Anwesenheit ausreichender Feuchtigkeit als Salzlösung an die Oberfläche der Außenwand befördert. Dort kommt es bei Verdunstung der Feuchtigkeit zur Kristallisation der Salze und es entstehen schmutzigweiße bis schmutziggelbe Ausblühungen oder Krustenbildungen, die besonders auf dunklem Untergrund ins Auge fallen.

Das Mörtel- bzw. das Putzgefüge verliert beim Herauslösen des Bindemittels seine Festigkeit, und die Undichtigkeit des Porengefüges wird erhöht.

- Treibender Angriff

Gelangt das gebildete Calciumsulfat (CaSO_4) durch Bindung von Feuchtigkeit im Bauteil zur Auskristallisation, bildet sich Gipsstein ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).



Die Bindung von Kristallwasser führt zu einer Volumenvergrößerung (Verhältnis 1 : 2), die zu einer Sprengung des Porengefüges des Putzes führen kann. Die entstehenden Spannungen können zu Rissen und schalenförmigen Abplatzungen an der Oberfläche führen.

Über das Ausmaß des schädigenden Einwirkens des SO_2 -Gehaltes der Atmosphäre auf Putzoberflächen bzw. in Mörtelfugen sind in der Fachliteratur bisher keine genauen Angaben erfolgt. Dies liegt zum einen daran, daß es bisher noch keine gezielten Untersuchungen über die Auswirkungen von Luftverunreinigungen auf Putze und Mörtel gibt, und zum anderen daran, daß auftretende Risse, Abplatzungen und Ausblühungen in der Regel aus einer Wechselwirkung zwischen Umwelteinflüssen, Herstellungs-, Ausführungsfehlern und den Schadstoffen der Luft hervorgerufen werden.

Der schädigende Einfluß von SO_2 auf Putze ist nach bisherigem Stand der Erkenntnisse in der katalytischen Beteiligung an den oben beschriebenen Schäden zu sehen, die den Alterungs- und Verwitterungsprozeß beschleunigen und damit einen erhöhten Nachbesserungsaufwand notwendig machen. Eine quantitative Aussage über etwaige Einschränkungen des Langzeitverhaltens aufgrund der schädigenden Einwirkung von Luftverunreinigungen liegt zur Zeit noch nicht vor.

Partikelförmige Luftverunreinigungen

Partikelförmige Luftverunreinigungen in Form von Staub oder Ruß bewirken ein Verschmutzen der ihnen ausgesetzten Bauteiloberflächen. Dies trifft auch auf verputzte Oberflächen zu. Die Verschmutzungen der Bauteiloberfläche, die oft besonders deutlich an der regen- und windabgewandten Seite zu beobachten ist, zeigen mit den Jahren ein Erscheinungsbild, daß durch einen unregelmäßigen Verschmutzungsgrad gekennzeichnet ist.

So wechseln saubere und stark verschmutzte Fassadenbereiche ineinander über und können über die Aufhebung der baulichen Gliederung eines Gebäudes zu starken Beeinträchtigungen des Erscheinungsbildes führen. Besonders die in Regenwasser gelösten Schmutzpartikel hinterlassen deutlich erkennbare Fließbahnen. Auf hellen verputzten Fassaden, bei denen Staub und Ruß aufgrund der kapillaren Wasseraufnahme im Porensystem gut haften bleiben, werden die Schmutzablagerungen besonders deutlich sichtbar.

Für die unregelmäßige Verschmutzung von verputzten Fassaden können in Anlehnung an die Aussagen von Snethlage und Arendt (171) zu den Natursteinen folgende Gründe aufgeführt werden:

- Unterschiedliche Regenexposition:
Dem Regen ausgesetzte Teile sind geringer verschmutzt als die geschützten.
- Ablaufendes Regenwasser:
An Fassaden oder Mauern ablaufendes Regenwasser kann entweder reinigen oder dunkle Schmutzfahnen ausbilden.
- Ungleichmäßige Oberflächenstruktur:
Rauhe Oberflächen verschmutzen leichter, weil der Schmutz besser haften kann.
- Unterschiedliche mikroklimatische Bedingungen:
Unterschiedliche mikroklimatische Bedingungen führen zu einem unterschiedlichen Erhaltungszustand einzelner Fassadenteile.

Schadensbeispiele bestehender stark verschmutzter Fassaden weisen darauf hin, daß sich entstehende Schmutzfahnen konstruktiv durch die Ausbildung von Tropfkanten verhindern lassen. Eine Beeinträchtigung des Langzeitverhaltens von Putzfassaden durch partikelförmige Luftverunreinigungen ist bisher nicht festgestellt worden.

Eine schädigende Wirkung auf die Bausubstanz kann vom Staub ausgehen, wenn die Ablagerungen auf Fassadenoberflächen gasförmige Luftverunreinigungen adsorbieren. Die Staubablagerung kann dann je nach Schadstoffgehalt und Feuchtigkeitsangebot als Katalysator bei der Bildung von Säuren, oder selbst als ätzende Kompresse auf der Bauteiloberfläche wirken. Das Ausmaß dieser Schädigungsmöglichkeit auf verputzten Fassaden ist bisher nicht abgeschätzt worden.

3.3.1.3 Nachbesserung

Umfang und Form der auszuführenden Nachbesserungsarbeiten richten sich objektspezifisch nach dem Ausmaß der aufgetretenen Schäden, und sollen in einem ausgewogenen Verhältnis zur noch zu erwartenden Lebensdauer des Gesamtbauteils bzw. -gebäudes stehen.

Aus der Erkenntnis des Wirkungsmechanismus von Schwefeldioxid (SO_2) auf kalk- und zementhaltige Putze und Mörtel ergibt sich für die Nachbesserung die vordringliche Aufgabe, daß Eindringen von Feuchtigkeit in den Putz zu verhindern. Damit können gleichzeitig die chemischen Reaktionen verhindert werden.

Die Nachbesserungen können folgende Maßnahmen umfassen:

- Beseitigung baulicher Mängel (z.B. der Durchfeuchtungsursache).
- Beseitigung der Ausblühungserscheinungen.
- Ausbessern von Rissen und Abplatzungen mit Kunstharz- oder mineralischen Mörteln.
- (hydrophobierende) Imprägnierung oder Beschichtung der Oberfläche.

Die durch partikelförmige Luftverunreinigungen entstehenden Verschmutzungen der Fassadenoberfläche machen einen erhöhten Reinigungsaufwand notwendig, wobei je nach Verschmutzungsgrad aufwendige Reinigungsmaßnahmen erforderlich sein können. Die Reinigungsverfahren werden nach

- der Reinigung mit Wasser,
- mechanischen Reinigungsverfahren und
- chemischen Reinigungsverfahren

unterschieden. Als vorbeugenden Schutz vor starken Verschmutzungen wird bei verputzten, unbehandelten Fassaden wie bei anderen mineralischen, porösen Baustoffen häufig eine farblose Imprägnierung auf Silikat-, Siloxan- oder Silanbasis empfohlen.

3.3.2 Mörtel und Putze mit behandelten Oberflächen

Bei Mörteln und Putzen mit behandelter Oberfläche ist es die Beschichtung, die unmittelbar der Atmosphäre und damit den schädigenden Atmosphärien ausgesetzt ist. Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff und Ozon sind nachweisbar an einem beschleunigten Verwitterungsverhalten der Beschichtungsstoffe beteiligt. Die Beteiligung anderer Schadstoffe (Stickoxide, Schwefelsäure, Kohlendioxid etc.) am beschleunigten Verwitterungsverhalten wird vermutet, kann jedoch noch nicht durch ausreichende Untersuchungsergebnisse belegt werden.

3.3.2.1 Erscheinungsbilder

Die aufgrund des Einwirkens von Luftverunreinigungen entstehenden Schäden an den Beschichtungen von Mörteln und Putzen können folgende Erscheinungsbilder aufweisen:

Beschichtungen von Außenoberflächen weisen aufgrund der gestiegenen Umweltbelastung erhöhte Schichtdickenverluste auf. Sie zeigen Farbänderungen, neigen zum Abkreiden und zu Glanzverlusten.

Kurze Zeit nach dem Auftragen der Beschichtung können verputzte Fassaden starke Verschmutzungen aufweisen, die zu deutlichen Abweichungen des ursprünglichen Erscheinungsbildes führen. Besonders ablaufendes Regenwasser hinterläßt deutlich sichtbare Fließbahnen. Die Verschmutzungen können aufgrund der standortbedingten Luftverunreinigungen und abhängig von der Qualität des Anstrichsystems sehr unterschiedlich sein, und sind oft auf der schlagregenabgewandten Seite verstärkt zu beobachten.

3.3.2.2 Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen

Neben den konstruktiven Schutzmaßnahmen übernehmen die auf Putzuntergründen aufgetragenen Beschichtungen außer der Gestaltung der Fassadenoberfläche den Schutz des Untergrundes vor der Zerstörung durch Witterungseinflüsse. Standortbedingte Luftverunreinigungen können jedoch dazu führen, daß diese Funktionen nicht mehr ausreichend übernommen werden können.

Schwefeldioxid

Von den luftverunreinigenden Stoffen wird vor allem die schädigende und zerstörende Wirkung des Schwefeldioxids auf Anstriche und ähnlichen Beschichtungen beschrieben. SO_2 kann "... unmittelbar die Beschichtung in dem besonders kritischen Zustand der Filmbildungsphase und beim Trocknungs-/Härtungsvorgang beeinflussen ...", und weiterhin mit "... Bindemitteln, Pigmenten und Füllstoffen chemische Reaktionen eingehen" (Groß 40). Die schädigende Wirkung von SO_2 auf Beschichtungen zeigt sich nach Groß (40) u. a. in:

- Glanzverlusten,
- Farbänderungen (z. B. Ausbleichen),
- Abkreiden,
- Ribbildung und
- Schichtdickenabbau.

Entstandene Ribbildungen können Folgeschäden nach sich ziehen, wenn über die Risse eindringende Feuchtigkeit zum Ablösen und Abblättern der Beschichtung führt.

Schwefelwasserstoff

Grau-braun bis schwarze Farbänderungen der Beschichtungen werden auf das Einwirken von Schwefelwasserstoff (H_2S) zurückgeführt. Sie werden durch die chemische Reaktion von H_2S mit bleihaltigen Pigmenten verursacht.

Ozon

Bekannt ist ebenfalls die schädigende Einwirkung von Ozon auf organische Materialien. Ozon greift bevorzugt an Doppelbindungen enthaltende, organische Verbindungen an und führt durch Bindungssprengungen zu deren Abbau. Der Abbau führt zu einer Versprödung der Oberflächenschicht. Aus diesem Grunde erweisen sich gesättigte Polymere als Bindemittel beständiger als ungesättigte.

Neben diesen bekannten Auswirkungen von SO_2 , H_2S und Ozon gibt es vereinzelte Angaben in der Literatur über die Wirkung der Schadstoffe $\text{SO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$, Ammoniak, Stickstoffoxid, Chlor/Chlorwasserstoffsäure, Fluorwasserstoffsäure und Kohlendioxid, die jedoch nach Groß (40) keine generelle Aussage über ihre Auswirkungen auf Beschichtungen (auf Putzoberflächen) zulassen. Groß weist darauf hin, daß im Rahmen einer systematischen Erforschung der Wechselwirkung zwischen Luftverunreinigungen und Beschichtungen noch viele Fragen offen bleiben.

Zieht man an dieser Stelle einen Vergleich zu den Aussagen, die in der Fachliteratur über die Beschichtungen von Eisen und Stahl (vgl. Kap. 4.1) gemacht werden, so ist festzuhalten, daß durch das Einwirken von Schadstoffen der Luft die Lebensdauer von Beschichtungen reduziert wird. Das ähnliche Erscheinungsbild natürlicher und beschleunigter Verwitterungsprozesse von Beschichtungen macht es jedoch zur Zeit noch nicht möglich, das schädigende Ausmaß von Luftverunreinigungen quantitativ zu erfassen.

Partikelförmige Luftverunreinigungen

Partikelförmige Luftverunreinigungen in Form von Staub oder Ruß bewirken ein Verschmutzen der ihnen ausgesetzten Bauteiloberfläche. Dies trifft für die behandelten Oberflächen auf verputzten Fassaden ebenso zu wie für die unbehandelten Oberflächen, so daß für das entstehende Schadensbild, die Schadensursache und die Nachbesserung die in Kap. 3.3.1.2 erfolgten Ausführungen auch hier zutreffend sind.

3.3.2.3 Nachbesserung

Umfang und Form der auszuführenden Nachbesserungsarbeiten richten sich objektspezifisch nach dem Ausmaß der aufgetretenen Schäden, und sollen in einem ausgewogenen Verhältnis zur noch zu erwartenden Lebensdauer des Gesamtbauteils bzw. -gebäudes stehen.

Aus der Erkenntnis über den Wirkungsmechanismus von Schwefeldioxid (SO_2) auf Beschichtungen (vgl. auch Kap. 4.1) ergibt sich, daß in besonders belasteten Gebieten (Industrieatmosphäre) mit deutlichen höheren Schichtdickenverlusten gegenüber unbelasteten Gebieten (Landatmosphäre) zu rechnen ist. Soll die neben der Farbgestaltung eines Gebäudes beabsichtigte Schutzfunktion der Beschichtung gewährleistet sein, so muß die Beschichtung in kürzeren Abständen erneuert werden.

Es stellt sich jedoch die Frage, ob eine mehrmalige Erneuerung problemlos möglich ist, wenn das zu beschichtende Außenbauteil als Gesamtsystem noch funktionieren soll. Es kann unter dem Aspekt der Dampfdiffusion notwendig sein, die alte Beschichtung vor dem Neuauftrag zu entfernen, was in der Regel nur mit größerem Aufwand gelingt.

Die durch partikelförmige Luftverunreinigungen entstehenden Verschmutzungen der Fassadenoberfläche machen einen erhöhten Reinigungsaufwand notwendig, wobei je nach Verschmutzungsgrad aufwendige Reinigungsmaßnahmen erforderlich sein können. Die Reinigungsverfahren werden nach

- der Reinigung mit Wasser,
- mechanischen Reinigungsverfahren und
- chemischen Reinigungsverfahren

unterschieden. Neben der Erhaltung des Erscheinungsbildes schützt die Reinigung der Fassade vor möglichen Folgeschäden, die von Staubbilagerungen ausgehen können.

3.3.3 Zusammenfassung

Über die Auswirkungen luftverunreinigender Schadstoffe auf Putze und Mörtel liegen zur Zeit noch keine speziellen Untersuchungen und nur wenige Veröffentlichungen vor. Dies gilt besonders für Putze mit organischen Bindemitteln. Bei den Putzen mit mineralischen Bindemitteln wird der schädigende Einfluß des Schwefeldioxids (SO_2) beschrieben. Die schädigende Wirkung von SO_2 verläuft hier ähnlich wie bei anderen mineralischen Baustoffen, wobei der lösende oder treibende Angriff des SO_2 -Gehaltes der Luft im Prinzip der Einwirkung durch schwefelhaltiges Wasser, Böden und stark konzentrierter Gase entspricht. Das Ausmaß der Schädigung wird durch den SO_2 -Gehalt der Luft, Exposition und Struktur der Oberfläche sowie materialspezifischen Kenngrößen bestimmt, wobei eine quantitative Abschätzung der Schädigung aufgrund der Ursachenverflechtung bei den auftretenden Schäden bisher nicht erfolgt ist.

Da die bisher auftretenden Schäden durch chemische Reaktionen hervorgerufen werden, zu deren Ablauf Feuchtigkeit notwendig ist, zielen die Nachbesserungsmaßnahmen darauf ab, das Eindringen von Feuchtigkeit in das Bauteil zu verhindern.

Die partikelförmigen Luftverunreinigungen führen zu Verschmutzungen der Fassade und machen besonders im Hinblick auf die Wasserführung an konstruktiv ungünstig gestalteten und mit hellen Farbtönen beschichteten Außenoberflächen einen erhöhten Reinigungsaufwand notwendig. Der Grad des notwendigen Reinigungsaufwandes kann hierbei aufgrund unterschiedlicher, lokaler Immissionen sehr verschieden sein.

Aus den bisherigen Erkenntnissen lassen sich keine Angaben zu einer Reduzierung der Lebenserwartung von Putzen und Mörteln machen, die auf Luftverunreinigungen zurückzuführen sind. Es ist jedoch wie bei anderen mineralischen Baustoffen von einer beschleunigenden Beteiligung bei der Schadensentwicklung anderer Ursachen und durch die Zunahme der Beanspruchung von einer beschleunigten Alterung auszugehen, so daß bei Putzen und Mörteln ein erhöhter Nachbesserungs- und Reinigungsaufwand notwendig ist, um eine Lebensdauer zu erzielen, die der in nicht schadstoffbelasteter Atmosphäre entspricht.

Etwas anders stellt sich die Situation bei den Beschichtungen dar. Hier weisen Untersuchungen aus dem Metallbereich (vgl. Kap. 4.1) auf einen deutlichen Schichtdickenverlust der Beschichtungen in belasteten Gebieten hin, so daß von einer deutlichen Verminderung ihrer Lebensdauer auszugehen ist. Aus diesem Grund müssen die Beschichtungen in belasteten Gebieten je nach ihrer Beanspruchung häufiger erneuert werden. Dabei sind auch die Probleme zu berücksichtigen, die eine mehrmalige Erneuerung der Beschichtung mit sich bringen kann. Unter Umständen muß z. B. die alte Beschichtung eines Gebäudes vollständig entfernt werden, wenn dies aus dampfdiffusionstechnischen Gründen erforderlich ist. Der damit verbundene größere Arbeitsaufwand und die höheren Kosten sind nicht unerheblich.

3.4 Ziegel- und Kalksandsteinsichtmauerwerk

Ziegel- oder Kalksandsteine haben sich bei regelgerechter Herstellung, Planung und Ausführung im Sichtmauerwerk bewährt. Sie besitzen eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber biologischen, chemischen und physikalischen Beanspruchungen, so daß bei Sichtmauerwerken bei regelgerechter Anwendung mit einer langen Standzeit zu rechnen ist.

Hinsichtlich der Luftverunreinigung und ihrer schädigenden Einwirkung auf Sichtmauerwerk liegen nur sehr vereinzelte Veröffentlichungen vor. Hierbei handelt es sich im wesentlichen um Stellungnahmen zu Verschmutzungen des Kalksandsteinsichtmauerwerks und deren Vermeidung.

Das Einwirken saurer, luftverunreinigender Schadstoffe wie SO_2 , CO_2 , NO_x u. a. auf Ziegel- und Kalksandsteinsichtmauerwerk ist bisher nicht ausführlich untersucht worden. Die poröse Gefügestruktur des Ziegel- und des Kalksandsteines bietet jedoch die Voraussetzung für die Aufnahme dieser Schadstoffe ins Bauteil, wo es in Verbindung mit Feuchtigkeit zur Bildung von Salzlösungen mit ihren schädigenden Auswirkungen kommen kann.

3.4.1 Erscheinungsbilder

Die aufgrund des Einwirkens von Luftverunreinigungen entstehenden Schäden an Ziegel- und Kalksandsteinsichtmauerwerk können folgende Erscheinungsbilder aufweisen:

An der Oberfläche von Sichtmauerwerk zeigen sich weiße bis schmutzig-gelbe Ausblühungen und Aussinterungen, die große Teile der Mauerwerks-oberfläche betreffen können, und besonders auf dunklem bzw. farbigem Untergrund ins Auge fallen.

Neben dieser Beeinträchtigung, die in erster Linie das Erscheinungsbild betrifft, kann es aufgrund des Sprengdruckes der unterhalb der Oberfläche auskristallisierenden Salze zu Schädigungen in Form örtlicher Absprengungen kommen.

Vor allem an den hellen, unbehandelten und ungeschützten Kalksandsteinfassaden ist bereits kurz nach ihrer Herstellung eine zunehmende Verschmutzung festzustellen. Unterschiedliche Beregnung und unterschiedliche Saugfähigkeit der Steine hinterlassen ein unregelmäßiges Verschmutzungsbild, bei dem Schmutzfahnen und Schmutzläufer besonders deutlich hervortreten.



Abb. 3.17: Ausblühungen auf Sichtmauerwerk

3.4.2 Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen

Wenn im folgenden von Schadstoffen SO_2 und CO_2 und ihren Wirkungsmechanismen auf Sichtmauerwerk gesprochen wird, so ist zu berücksichtigen, daß die Aufnahme der Schadstoffe aus der Atmosphäre nur eine unter mehreren möglichen Schadensursachen bei den Sichtmauerwerken darstellt, und daß aufgrund noch fehlender Untersuchungen keine Aussagen über das Ausmaß ihrer Beteiligung gemacht werden können. Die bauschädlichen Salze entstammen nach Karsten (52):

- dem Baustoff, wenn zur Herstellung verunreinigte Rohstoffe verwendet wurden,
- dem Boden, aus welchem Salze mit der aufsteigenden Bodenfeuchtigkeit in das Mauerwerk gelangen,
- Gebrauchswässern und
- der Atmosphäre. Hier bilden Kohlensäure und Schwefelsäure mit Baustoffanteilen Ausblühsalze.

Schwefeldioxid

Der in der verunreinigten Atmosphäre enthaltene gasförmige Schadstoff Schwefeldioxid (SO_2) gilt als der wichtigste Indikator für den Grad der Luftverunreinigung. Die Aufnahme des Schadstoffs erfolgt über verschiedene physikalische Wege, wobei nach

- nasser Deposition und
- trockener Deposition

unterschieden werden kann.

Bei der nassen Deposition erfolgt die Schadstoffaufnahme kapillar. Hierbei dringt das in der Atmosphäre mit Feuchtigkeit reagierende Schwefeldioxid (SO_2) als schweflige Säure (H_2SO_3), oder stärker konzentriert als Schwefelsäure (H_2SO_4) in das Sichtmauerwerk ein.

Bei der trockenen Deposition erfolgt die Aufnahme von SO_2 über die Diffusion und erst die chemische Reaktion mit Feuchtigkeit im Bauteil führt zur Bildung der schwefligen Säure bzw. der Schwefelsäure. Die Reaktionen erfolgen nach folgenden Gleichungen:



In beiden Fällen ist das Vorhandensein von Feuchtigkeit, sei es bereits vor dem Bauteil (Regen, Tau, Nebel) oder im Bauteil selber, die Voraussetzung für die Umwandlung von SO_2 in die aggressiven Medien der schwefligen Säure bzw. nachdem SO_2 an der Atmosphäre zu SO_3 oxidiert ist, in die Schwefelsäure.

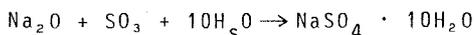
Die Menge der Schadstoffaufnahme könnte, wie von Luckat (60) bei den Natursteinen vorgeschlagen, aufgrund der Porosität der Baustoffe, durch eine Immissionsrate bestimmt werden.

Sie ist die von einer Flächeneinheit in einer Zeiteinheit aufgenommene Schadstoffmenge. Damit sind neben dem Grad der Luftverschmutzung durch SO_2 bei Ziegel- und Kalksandsteinsichtmauerwerk baustoffspezifische Kenngrößen wie

- Porosität,
- Oberflächenstruktur,
- Oberflächenbeschichtung sowie
- die Exposition des Bauteils

die Einflußfaktoren, die die Schadstoffaufnahme und damit die schädigende Wirkung von SO_2 bzw. den Säuren bestimmen.

Mit der Feuchtigkeit gelangen Salze ins Mauerwerk, die der Luft oder dem Mauerwerk selbst entstammen. Bei den Ziegeltonen reagiert Schwefel bei Vorhandensein von Feuchtigkeit mit den alkalischen Bestandteilen des Baustoffs Natrium und Kalium zu Natriumsulfat ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) und Kaliumsulfat ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Dies geschieht zum Beispiel nach folgender Reaktionsgleichung:



Die gelösten Salze werden durch die Feuchtigkeitsbewegungen (Kapillarität, Osmose) in porösen Baustoffen an die Oberfläche transportiert, wo die Feuchtigkeit verdunstet und die kristallisierten Salze als weißliche Ablagerungen zurückbleiben. Kristallisieren die Salze unterhalb der Oberfläche aus, so kann der entstehende Kristallisationsdruck zu Absprengungen an der Oberfläche führen (Salzabsprengungen).

Da der Eintritt bzw. das Vorhandensein von Feuchtigkeit der eigentliche Auslöser für das Entstehen von Salzlösungen mit ihren Folgen ist, kann der Luftverunreinigung nur eine verstärkende Beteiligung an Schäden, die ohnehin durch das Eindringen von Feuchtigkeit entstanden wären,

nachgesagt werden. Die verschiedenartigen sich überlagernden Schadensursachen lassen keinen Hinweis auf eine Verringerung der Standzeit von Sichtmauerwerken aus Ziegel- und Kalksandsteinen zu, die auf eine Zunahme der Luftverunreinigung zurückzuführen wäre.

Kohlendioxid

Über die schädigenden Auswirkungen von Kohlendioxid (CO_2) und kohlensäurehaltigem Wasser, welches in der Atmosphäre durch die Reaktion von CO_2 mit Regenwasser entsteht, liegen keine negativen Erfahrungen bei Sichtmauerwerken vor. Aus den baustoffspezifischen Eigenschaften und den bereits gewonnenen Erkenntnissen über das Einwirken von Schadstoffen auf mineralische Baustoffe läßt sich jedoch sagen, daß die Schadstoffaufnahme aufgrund der porösen Gefügestruktur über den gleichen physikalischen Weg der Kapillarität und der Diffusion erfolgt, wie die des Schwefeldioxids (SO_2). Zu Ausblühungserscheinungen und Salzabsprengungen kann es nur dann kommen, wenn die verwendeten Rohstoffe der Mauerziegel, Vormauerziegel oder Klinker entgegen DIN 105, Mauerziegel(1) schädliche Mergel oder Kalkeinschlüsse beinhalten. In ihrem Erscheinungsbild sind die Kalkaussinterungen der Mörtelfugen den Salzausblühungen sehr ähnlich. Sie können infolge des Einwirkens der Kohlensäure (H_2CO_3) auch an Sichtmauerwerken aus Ziegel- und Kalksandsteinen auftreten. Nicht carbonatisierte, lösliche Kalkanteile werden als Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) gelöst und an die Oberfläche transportiert, wo die Feuchtigkeit verdunstet und eine weiße Sinterschicht (Calciumcarbonat) hinterläßt.

Partikelförmige Luftverunreinigungen

Partikelförmige Luftverunreinigungen in Form von Staub oder Ruß bewirken ein Verschmutzen der ihnen ausgesetzten Bauteiloberflächen. Dies trifft auch auf Oberflächen aus Ziegel- und Kalksandsteinmauerwerk zu.

Die Verschmutzungen der Bauteiloberfläche, die oft besonders deutlich an der regen- und windabgewandten Seite zu beobachten ist, zeigen mit den Jahren ein Erscheinungsbild, das durch einen unregelmäßigen Verschmutzungsgrad gekennzeichnet ist.

So wechseln saubere und stark verschmutzte Fassadenbereiche ineinander über und können über die Aufhebung der baulichen Gliederung eines Gebäudes zu starken Beeinträchtigungen des Erscheinungsbildes führen. Besonders die in Regenwasser gelösten Schmutzpartikel hinterlassen deutlich erkennbare Fließbahnen. Auf hellen Kalksandsteinen, bei denen Staub und Ruß aufgrund der kapillaren Wasseraufnahme der porösen Steine im Porensystem gut haften bleiben, werden die Schmutzablagerungen besonders deutlich sichtbar.

Für die unregelmäßige Verschmutzung von Fassaden aus Sichtmauerwerk können in Anlehnung an die Aussagen von Snethlage und Arend (171) zu den Natursteinen folgende Gründe aufgeführt werden:

- Unterschiedliche Regenexposition:
Dem Regen ausgesetzte Teile sind geringer verschmutzt als die geschützten.
- Ablaufendes Regenwasser:
An Fassaden oder Mauern ablaufendes Regenwasser kann entweder reinigen oder dunkle Schmutzfahnen ausbilden.
- Ungleichmäßige Oberflächenstruktur:
Rauhe Oberflächen verschmutzen leichter, weil der Schmutz besser haften kann.
- Unterschiedliche mikroklimatische Bedingungen:
Unterschiedliche mikroklimatische Bedingungen führen zu einem unterschiedlichen Erhaltungszustand einzelner Fassadenteile.

Schadensbeispiele bestehender, stark verschmutzter Sichtmauerwerke weisen darauf hin, daß sich entstehende Schmutzfahnen konstruktiv durch die Ausbildung von Tropfkanten verhindern lassen. Eine schädigende Wirkung auf die Bausubstanz kann vom Staub ausgehen, wenn die Ablagerungen auf Sichtmauerwerkoberflächen gasförmige Luftverunreinigungen adsorbieren. Die Staubablagerung kann dann je nach Schadstoffgehalt und Feuchtigkeitsangebot als Katalysator bei der Bildung von Säuren oder selbst als ätzende Kompresse auf der Bauteiloberfläche wirken. Das Ausmaß dieser Schädigungsmöglichkeit auf Sichtmauerwerke ist bisher nicht abgeschätzt worden. Durch das Einwirken partikelförmiger Luftverunreinigungen sind keine Beeinträchtigungen des Langzeitverhaltens von Sichtmauerwerken zu erwarten.

3.4.3 Nachbesserung

Umfang und Form der auszuführenden Nachbesserungsarbeiten richten sich objektspezifisch nach dem Ausmaß der aufgetretenen Schäden, und sollen in einem ausgewogenen Verhältnis zur noch zu erwartenden Lebensdauer des Gesamtbauteils bzw. -gebäudes stehen.

Aus der Erkenntnis des Wirkungsmechanismus von Schwefeldioxid (SO_2) auf Ziegel- und Kalksandsteinsichtmauerwerk ergibt sich für die Nachbesserung die vordringliche Aufgabe, daß Eindringen von Feuchtigkeit in das Mauerwerk zu verhindern. Damit können gleichzeitig die chemischen Reaktionen verhindert werden. Das Verhindern von Durchfeuchtungen kann nach genauerer Analyse der aufgetretenen Durchfeuchtungsursache durch die Wahl der richtigen Methode zur Mauerwerkstrockenlegung geschehen.

Eine Hydrophobierung des Sichtmauerwerks, die das Eindringen von Feuchtigkeit in den Baustoff verhindert, ohne seine Dampfdurchlässigkeit zu mindern, bietet einen vorbeugenden Schutz, so daß auf diese Weise eine dauerhafte Verhinderung von Versalzungsschäden erreicht werden kann.

Um einen aus der Verschmutzung resultierenden erhöhten Reinigungsaufwand zu vermeiden, wird als Vorbeugung gegenüber starken Verschmutzungen von den Kalksandsteinherstellern eine farblose Imprägnierung auf Silikat-, Siloxan- oder Silanbasis empfohlen.

Bei der Wahl eines geeigneten Imprägnierungsmittels ist auf

- gutes Eindringvermögen,
- Alkalibeständigkeit,
- klebfreie Austrocknung und
- UV-Beständigkeit

zu achten, um durch das Verhindern des Eindringens von Regenwasser gleichzeitig einer hohen Verschmutzung vorzubeugen.

Deckende Anstriche können diese Aufgabe ebenso übernehmen. Sie besitzen an der Atmosphäre eine Lebensdauer von etwa 10 Jahren und müssen dann aufgrund von Abwitterungen und Verschmutzungen erneuert werden. Empfohlen werden Anstriche mit geringen Dampfdiffusionswiderständen, um einen Feuchtigkeitsaustritt auf dem Diffusionsweg aus dem Bauteil zu ermöglichen.

Die aus Mangel an vorbeugenden Maßnahmen durch partikelförmige Luftverunreinigungen hervorgerufenen Verschmutzungen der Fassadenoberflächen machen einen erhöhten Reinigungsaufwand notwendig, wobei je nach Verschmutzungsgrad aufwendige Reinigungsmaßnahmen erforderlich sein können. Die Reinigungsverfahren werden nach

- der Reinigung mit Wasser,
- mechanischen Reinigungsverfahren und
- chemischen Reinigungsverfahren

unterschieden. Neben der Erhaltung des Erscheinungsbildes schützt die Reinigung der Fassade vor möglichen Folgeschäden, die von Staubablagerungen ausgehen können.

3.4.4 Zusammenfassung

Über die Auswirkungen luftverunreinigender Schadstoffe auf Sichtmauerwerk aus Ziegel- und Kalksandsteinen liegen zur Zeit noch keine speziellen Untersuchungen vor. Feststellbar ist jedoch eine zunehmende Verschmutzung, die besonders deutlich an Kalksandsteinsichtmauerwerken erkennbar ist. Als vorbeugende Maßnahme gegen starke Verschmutzung werden Imprägnierungen empfohlen, die das Eindringen von verschmutztem Regenwasser in das Porensystem des Sichtmauerwerks verhindern. Neben der Vermeidung der Verschmutzung erzielt man mit der Imprägnierung von Sichtmauerwerken eine Reduzierung der kapillaren Wasseraufnahme. Hierdurch wird auch die Bildung von baustoffschädlichen Salzen reduziert, zu deren Entstehung Feuchtigkeit notwendig ist und durch das Vorhandensein saurer Atmosphärien der Luft (SO_2 , CO_2) im Mauerwerk fördernd unterstützt wird. Werden regelgerecht erstellte Sichtmauerwerke durch Imprägnierungen oder auch deckende Anstriche vor dem Zutritt von Feuchtigkeit geschützt, so sind vom heutigen Stand der Erkenntnisse keine Schäden durch Luftverunreinigungen zu erwarten, die zu einer Einschränkung der Lebenserwartung von Sichtmauerwerken führen können.

3.5 Asbestzement

Asbestzementplatten und -formstücke finden als Fassadenbekleidungen und Dacheindeckungen häufige Verwendung im Hochbau. An der Außenoberfläche von Außenbauteilen dienen sie in erster Linie der Abführung von Regenwasser. Sie sind direkt der Atmosphäre ausgesetzt, wo sie aufgrund ihrer guten Witterungsbeständigkeit eine lange Lebensdauer besitzen.

Durch ihre Verwendung an Außenbauteilen sind beschichtete und unbeschichtete Asbestzementprodukte unmittelbar den Luftverunreinigungen ausgesetzt und werden von ihnen schädigend angegriffen.

3.5.1 Erscheinungsbilder

In einem von Heide und Rottenbacher erstellten Forschungsbericht (43) wird auf die Korrosion von Asbestzementprodukten in schwefeldioxid- und kohlendioxidhaltigen Atmosphären hingewiesen. Bekannt sind auch die Einflüsse partikelförmiger Luftverunreinigungen, die im wesentlichen zu einem Verschmutzen der ihnen ausgesetzten Bauteiloberfläche führen. Die aufgrund des Einwirkens von Luftverunreinigungen entstehenden Schäden an Bauteilen aus Asbestzement weisen folgende Erscheinungsbilder auf:

Bei der makroskopischen Betrachtung der von Heide und Rottenbacher künstlich bewitterten und mit Schadgasen beaufschlagten Asbestzementproben zeigten sich gelbliche bis hellbraune und weiße Verwitterungsschichten. Nach längerer Versuchsdauer bildete die Verwitterungsschicht an der Oberfläche praktisch keinen festen Verbund mit der Zementmatrix mehr und löste sich schon bei der geringsten mechanischen Beanspruchung vom Untergrund. Unter der abgelösten Verwitterungsschicht wurde das nicht verwitterte Grundmaterial wieder erkennbar. Es traten Schichtdickenverluste auf, die durch Gewichtsverluste nachweisbar sind.

Die Fassadenbekleidungen aus Asbestzement weisen bereits kurz nach ihrer Herstellung starke Verschmutzungen auf, die zu einer deutlichen Abweichung des ursprünglichen Erscheinungsbildes führen. Ablaufendes Regenwasser hinterläßt deutlich sichtbare Fließbahnen. Die Verschmutzungen können aufgrund der standortbedingten Luftverunreinigungen sehr unterschiedlich sein, und sind oft auf der schlagregenabgewandten Seite verstärkt zu beobachten.

3.5.2 Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen

Asbestzementprodukte weisen eine chemische Beständigkeit gegenüber anorganischen und organischen Säuren mit einem pH-Wert > 6 auf. Durch Luftverunreinigungen entstehender saurer Regen weist dagegen deutlich niedrigere pH-Werte auf und wirkt schädigend auf den Verwitterungsprozeß von Asbestzementprodukten ein. Die Schädigungsmechanismen entsprechen hierbei aufgrund des gleichen Bindemittels (Zement) denen bei Normalbeton, wobei jedoch aufgrund der höheren Dichtigkeit von Asbestzement die aggressiven Medien weniger wirksam sind.

Schwefeldioxid und Kohlendioxid

Von den luftverunreinigenden Stoffen, die schädigende Auswirkungen auf Asbestzementprodukte haben, werden in der Fachliteratur besonders Schwefeldioxid (SO_2), Kohlendioxid (CO_2) und die partikelförmigen Luftverunreinigungen erwähnt.

Es hat sich herausgestellt, daß die Wechselwirkung von natürlichen Witterungsbedingungen und den Schadgasen zu einer beschleunigten Zerstörung des Zementgefüges führt, in deren Folge es zu einer vermehrten Freisetzung von Asbestfasern kommt. Die Zerstörung des Zementgefüges erfolgt im wesentlichen durch die Bildung von Gips, welches nach anfänglicher Verdichtung der Oberfläche der Asbestzementproben in Folge lösender und treibender Angriffe eine zunehmende Lockerung der Bindung zwischen Zement und Asbest bewirkt.

In der labormäßigen Untersuchung (43) hat sich herausgestellt, daß eine quantitative Erfassung der Einflüsse der Reaktionsmechanismen einzelner Einflußgrößen, insbesondere der Schadstoffe, außerordentlich schwierig ist.

Bei beschichteten Asbestzementprodukten weisen erste Untersuchungen auf eine Verzögerung des Verwitterungsverhaltens durch die Beschichtung hin. Durch eine werksmäßig aufgetragene vollständige Beschichtung der Asbestzementplatten wird ebenfalls die Freisetzung von Asbestzementfasern sehr stark vermindert.

Partikelförmige Luftverunreinigungen

Partikelförmige Luftverunreinigungen in Form von Staub oder Ruß bewirken ein Verschmutzen der ih-

nen ausgesetzten Bauteiloberflächen. Dies trifft auch auf Asbestzementprodukte an Außenbauteilen zu.

Verschmutzungen der Oberfläche von Asbestzementfassaden führen besonders bei hellen Beschichtungen zu einer auffälligen Beeinträchtigung des Erscheinungsbildes. Für die unregelmäßige Verschmutzung von Asbestzementfassaden können in Anlehnung an die Aussagen von Snethlage und Arendt (171) zu den Natursteinen folgende Gründe aufgeführt werden:

- Unterschiedliche Regenexposition:
Dem Regen ausgesetzte Teile sind geringer verschmutzt als die geschützten.
- Ablaufendes Regenwasser:
An Fassaden ablaufendes Regenwasser kann entweder reinigen oder dunkle Schmutzfahnen ausbilden.
- Ungleichmäßige Oberflächenstruktur:
Rauhe Oberflächen verschmutzen leichter, weil der Schmutz besser haften kann.
- Unterschiedliche mikroklimatische Bedingungen:
Unterschiedliche mikroklimatische Bedingungen führen zu einem unterschiedlichen Erhaltungszustand einzelner Fassadenteile.

Eine schädigende Wirkung auf die Bausubstanz kann vom Staub ausgehen, wenn die Ablagerungen auf Fassadenoberflächen gasförmige Luftverunreinigungen adsorbieren. Die Staubablagerung kann dann je nach Schadstoffgehalt und Feuchtigkeitsangebot als Katalysator bei der Bildung von Säuren, oder selbst als ätzende Kompressen auf der Bauteiloberfläche wirken. Das Ausmaß dieser Schädigungsmöglichkeit auf Asbestzementprodukte ist bisher nicht abgeschätzt worden.

3.5.3 Nachbesserung

Umfang und Form der auszuführenden Nachbesserungsarbeiten richten sich objektspezifisch nach dem Ausmaß der aufgetretenen Schäden, und sollen in einem ausgewogenen Verhältnis zur noch zu erwartenden Lebensdauer des Gesamtbauteils bzw. -gebäudes stehen.

Aus der Erkenntnis des beschleunigten Verwitterungsverhaltens von Asbestzementprodukten in Schwefeldioxid- und kohlendioxidhaltiger Atmosphäre ist es unter Umständen geboten, Bauelemente aus Asbestzement nachträglich zu beschichten bzw. ihre Beschichtung zu erneuern, um einer Verringerung ihrer Lebensdauer vorzubeugen.

Die durch partikelförmige Luftverunreinigungen entstehenden Verschmutzungen der Fassadenoberfläche machen einen erhöhten Reinigungsaufwand notwendig, wobei je nach Verschmutzungsgrad aufwendige Reinigungsmaßnahmen erforderlich sein können. Die Reinigungsverfahren werden nach

- der Reinigung mit Wasser,
- den mechanischen Reinigungsverfahren und
- den chemischen Reinigungsverfahren

unterschieden. Neben der Erhaltung des Erscheinungsbildes schützt die Reinigung der Fassade vor möglichen Folgeschäden, die von Staubablagerungen ausgehen können.

Konstruktiv ausgebildete Wasserführungen können den Verschmutzungsgrad begrenzen und müssen bei unzureichender Planung ggf. nachträglich ausgeführt werden.

3.5.4 Zusammenfassung

Über die Auswirkungen luftverunreinigender Schadstoffe auf Asbestzementprodukte liegt eine erste grundlegende Betrachtung von Heide und Rottenbacher (43) vor, die das schädigende Einwirken von schwefeldioxid- und kohlendioxidhaltiger Atmosphäre untersucht haben.

In dieser labormäßigen Untersuchung wurden Korrosionserscheinungen, Korrosionsfortschritt und auftretende Asbestfaserfreisetzung analysiert. Es wurde festgestellt, daß der Verwitterungsprozeß der Asbestzementproben unter schadstoffhaltigen Umweltbedingungen beschleunigt wird. Der Verwitterungsverlauf entspricht hierbei aufgrund des gleichen Bindemittels (Zement) dem von Normalbeton, wobei jedoch aufgrund der höheren Dichtigkeit von Asbestzement die Verunreinigungen weniger aufgenommen und wirksam werden können. Infolge der Zerstörung des Zementgefüges erfolgt eine Lockerung und Abtragung der oberflächennahen Verwitterungsschicht, in deren Folge Asbestzementfasern frei werden. Beschichtungen auf Asbestzementprodukten verlangsamen den Verwitterungsprozeß.

Durch die Beschleunigung des Verwitterungsprozesses tragen Luftverunreinigungen dazu bei, die Lebensdauer von Asbestzementprodukten zu verringern.

Partikelförmige Luftverunreinigungen führen zu Verschmutzungen der ihnen ausgesetzten Bauteiloberfläche, und machen besonders im Hinblick auf die Wasserführung an konstruktiv ungünstig gestalteten und mit hellen Farbtönen beschichteten Außenoberflächen aus Asbestzement einen erhöhten Reinigungsaufwand notwendig. Der Grad des notwendigen Reinigungsaufwandes kann hierbei aufgrund unterschiedlicher lokaler Immissionen sehr verschieden sein.

3.6 Glas

Glas ist ein sehr alter Werkstoff, der aufgrund der heute weiter entwickelten produktionstechnischen Möglichkeiten in der modernen Architektur zunehmend Verwendung findet. Seine Anwendung im Hochbau findet in erster Linie an Außenbauteilen statt, womit Glas unmittelbar der verunreinigten Atmosphäre ausgesetzt ist.

Aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung besitzt Glas eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Säuren (Ausnahme Flußsäure) sowie gegen saure und neutrale Salzlösungen. Aus diesem Grund wird modernes Glas, wie es heute im Hochbau Verwendung findet, von den sauren Atmosphärenteilchen (SO_2 , CO_2 , NO_x) und deren Folgeprodukte nach dem bisherigen Stand der Erkenntnisse nicht angegriffen.

Eine Ausnahme bilden die historischen Glasfenster. In einer Untersuchung über das Einwirken von Luftverunreinigungen auf Kunstwerke der Glasmalerei (46), die vom Deutschen Museum in München durchgeführt wurde, wird festgestellt, daß Luftverunreinigungen im Zusammenwirken mit Luftfeuchtigkeit den Verwitterungsprozeß progressiv beschleunigen. Die Schäden an mittelalterlichen Glasfenstern stellen jedochein gesondertes Problem der Denkmalpflege dar, dem mit gezielten Maßnahmen und deren wissenschaftlicher Begleitung begegnet werden soll und das hier nicht abgehandelt werden kann.

Die Lebensdauer des Baustoffs Glas erfährt bei einer fachgerechten Anwendung im Hochbau aufgrund der Luftverunreinigungen keine Einschränkung. Sie wird heute bei der Anwendung der Isolier- oder Mehrscheibengläser, die aufgrund der gestiegenen Anforderungen an den Wärmeschutz vorgeschrieben sind, nicht mehr vom Baustoff Glas selbst bestimmt, sondern ist in der Regel von der Beständigkeit der Materialien für die Abdichtung der Mehrscheibengläser abhängig.

4. Schäden durch Luftverunreinigungen an Metallen

Metalle haben das Bestreben, sich aus einem durch den Produktionsprozeß entstandenen energiereichen, instabilen Zustand wieder in den ursprünglichen, energiearmen und stabilen Zustand zu verwandeln. Dieser Prozeß wird als Korrosion bezeichnet. Sie wird in DIN 50 900, Korrosion der Metalle (8), beschrieben und ist "... die Reaktion eines metallischen Werkstoffes mit seiner Umgebung, die eine meßbare Veränderung des Werkstoffes bewirkt und zu einem Korrosionsschaden führen kann."

Eine besondere Form der Korrosion stellt die atmosphärische Korrosion dar, bei der die folgenden atmosphärischen Einflußfaktoren die Korrosion bestimmen:

- Meeresnähe
- Regenmenge und -häufigkeit
- Windstärke und -richtung
- Nebelmenge
- Luftfeuchtigkeit
- Sonneneinstrahlung
- Durchschnittstemperatur
- Luftverunreinigungen.

Im folgenden soll dem Einfluß von Luftverunreinigungen besondere Aufmerksamkeit zukommen, ohne dabei jedoch die Wechselwirkung der beschriebenen Einflußgrößen ganz außer Betracht lassen zu können.

Schäden an Baumetallen, die auf Luftverunreinigungen zurückgeführt werden, zeigen sich als Korrosionserscheinungen unterschiedlicher Art. In der Fachliteratur wird einstimmig die beschleunigende Beteiligung vor allem saurer Atmosphäerilien beim Korrosionsprozeß festgestellt. Als maßgeblicher Schadstoff wird in erster Linie Schwefeldioxid (SO_2) genannt, aber auch Kohlendioxid (CO_2), Schwefelwasserstoff (H_2S), Stickoxide (NO_x), Ammoniak, Chlor, Chlorwasserstoff, Chlorid, organische Säuren, Verschmutzungen u. a. können die atmosphärische Korrosion beeinflussen.

Der aggressive Einfluß des Schwefeldioxids (SO_2) kann nicht allein nach seiner Konzentration beurteilt werden, obwohl in den Wintermonaten bei deutlich höheren Schwefeldioxidemissionen auch eine erhöhte Korrosionsgeschwindigkeit nachge-

wiesen ist (vgl. Kap. 4.1). Entscheidend ist neben der Schadstoffkonzentration die Luftfeuchtigkeit und der Staubbefall, denn Schwefeldioxid ist

- bei trockener Witterung unschädlich
- bei feuchter Witterung schädlich
- bei feuchter Witterung und Gegenwart von Staub sehr schädlich.

Versuchsergebnisse über die Bestimmung des Anteils der durch Luftverunreinigungen verursachten atmosphärischen Korrosion liegen besonders aus dem englisch-sprachigen Raum vor und sind im wesentlichen in den 30er Jahren erzielt worden. Sie münden in der Regel in folgender oder ähnlicher Aussage:

Metall	Atmosphärentyp		
	Industrie-atmosph.	Stadt-atmosph.	Land-atmosph.
Ungeschützter Stahl	30—60	20—30	10
Zink, verz. Stahl	4— 6	2— 4	1
Nickel, vern. Stahl	6	2	0,25
Kupfer	2— 5	1— 2	1
Aluminium	0,2—1	0,1—0,2	0,1

Tab. 4.1: Durchschnittlicher Schichtdickenverlust ($\mu\text{m/a}$) ausgewählter Metalle unter verschiedenen Umgebungsbedingungen (aus: Umweltbundesamt, 78, S. 39)

Die hier beschriebenen Schichtdickenverluste von Baumeetallen weisen tendentiell auf eine deutliche Beschleunigung des Alterungsprozesses von Metallen in Abhängigkeit vom jeweiligen Atmosphärentyp nach DIN 55 928, Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungen und Überzüge (9) hin.

Die Tabelle 4.1 zeigt, daß die stärker durch Luftverunreinigungen belasteten Industrie- und Stadtatmosphären gegenüber der Landatmosphäre deutlich höhere Schichtdickenverluste an Baumeetallen und metallischen Überzügen aufweisen und daher bei ihnen eine geringere Lebensdauer zu erwarten ist.

Um eine möglichst lange Lebensdauer bei den Baumeetallen zu erzielen, werden sie durch folgende Maßnahmen vor Korrosion geschützt:

- Aktiver Korrosionsschutz:

Beim aktiven Korrosionsschutz werden die Werkstoffe entsprechend den Anforderungen ihres Anwendungsbereiches ausgewählt und unter baukon-

struktiven sowie bauphysikalischen Gesichtspunkten so eingesetzt, daß korrosionsfördernde Stoffe möglichst von der Oberfläche ferngehalten werden.

- Passiver Korrosionsschutz:

Beim passiven Korrosionsschutz werden die Werkstoffe nach entsprechender Vorbehandlung mit

- organischen Beschichtungen,
- Überzügen aus metallischen Verbindungen (z. B. Eloxieren),
- metallischen Überzügen (z. B. Verzinken),
- nichtmetallisch-anorganischen Überzügen (z. B. Emaillieren),

versehen, die die Oberfläche vor Korrosion schützen sollen.

Beim passiven Korrosionsschutz ist die Beschichtung bzw. der Überzug direkt den Luftverunreinigungen ausgesetzt. Je nach Angriffsbedingungen und angreifenden Schadstoffen ist bei ihnen ein entsprechender Schichtdickenverlust (vgl. Kap. 3.3.2.2) feststellbar, so daß dadurch die schützende Funktion der Beschichtung aufgehoben werden kann und eine frühzeitige Erneuerung notwendig wird.

Bei einem Versuch einer quantitativen Erfassung des Ausmaßes der Korrosionsschäden, die auf Luftverunreinigungen zurückzuführen sind, stößt man auf eine Reihe von Problemen, deren Lösung bis heute noch aussteht. Zu diesen Problemen zählen:

- Die Vielzahl der an der Korrosion beteiligten natürlichen Einflußgrößen, die Vielzahl möglicher Schadstoffe sowie deren Wechselwirkung erschweren eine eindeutige Ursachenzuschreibung.
- Die makroklimatischen Bedingungen der verschiedenen Atmosphärentypen reichen als Kriterium für eine Beurteilung der auftretenden Korrosionsschäden aufgrund der heute erfolgenden weiträumigen Verteilung der Schadstoffe der Luft nicht aus.
- Die Vielzahl der in der Praxis verwendeten korrosionsschützenden Überzüge und Beschichtungen sowie die unterschiedliche Exposition der Bauteile erschweren einen Vergleich.

-
- Nicht bei jeder auftretenden Korrosion von Metallen tritt ein Korrosionsschaden entsprechend DIN 50 900, Korrosion der Metalle (8), als "Beeinträchtigung der Funktion eines metallischen Bauteils oder eines ganzen Systems durch Korrosion", ein. Bestimmte Nichteisenmetalle bilden durch die atmosphärische Korrosion eine schützende Oxidschicht (Patina), die das Metall vor einer weiteren Korrosion bewahrt. Eine schädigende Einwirkung von Luftverunreinigungen ist dann anzunehmen, wenn die Schutzschicht nicht zur Ausbildung kommen kann oder abgetragen und zerstört wird.

Das Einwirken der atmosphärischen Schadstoffe auf die am häufigsten im Bauwesen verwendeten Metalle Eisen, Stahl, Aluminium, Zink, Kupfer und Blei soll in den folgenden Kapiteln näher beschrieben werden.

4.1 Eisen und Stahl

Eisen ist der wichtigste, metallische Konstruktionsbaustoff im Hochbau. Seine Anwendung erfolgt als Stahl überwiegend in folgenden Bereichen:

- Konstruktionsbau
- Bewehrung im Beton,
- Rohrleitungen u. a.

Edelstahl findet Verwendung als

- Abdeckung
- Abläufe
- Befestigungsanker
- Fassadenbekleidungen
- Überdachungen
- Schrauben, Verbindungen u. a.

Während Edelstahl je nach seiner chemischen Zusammensetzung eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber atmosphärischer Korrosion besitzt, muß Eisen und Stahl in der Regel durch aktive und passive Maßnahmen vor Korrosion geschützt werden, um eine möglichst lange Lebensdauer von Stahlbauteilen zu gewährleisten.

Die Maßnahmen zum passiven Korrosionsschutz machen deutlich, daß es sich bei der Korrosion des Stahls nicht allein um die Korrosion des Stahls selber handelt, sondern vielmehr in erster Linie um die Korrosion seiner Beschichtung bzw. seines Überzuges.

Wird den Faktoren

- der konstruktiven Planung
- der Materialauswahl (z. B. Legierung)
- des Korrosionsschutzes
- der korrosiven Beanspruchung und
- der Ausführung

nicht genügend Rechnung getragen, so ist gerade bei der Anwendung von Eisen und Stahl an der Atmosphäre, wo in der Regel ausreichend Feuchtigkeit und Sauerstoff vorhanden sind, mit Korrosionsschäden von erheblichem Umfang zu rechnen. Die atmosphärische Korrosion des Eisens und des Stahls ist eine elektrochemische Reaktion, die bei vorhandenem Sauerstoffangebot bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von etwa 70 % beginnt. Durch die Korrosion bildet sich eine Rostschicht aus Eisenoxiden (FeO) und Eisenhydroxiden (FeOOH), die sich mit der Stahloberfläche verbindet, aber porös ist und leicht abblättern kann.

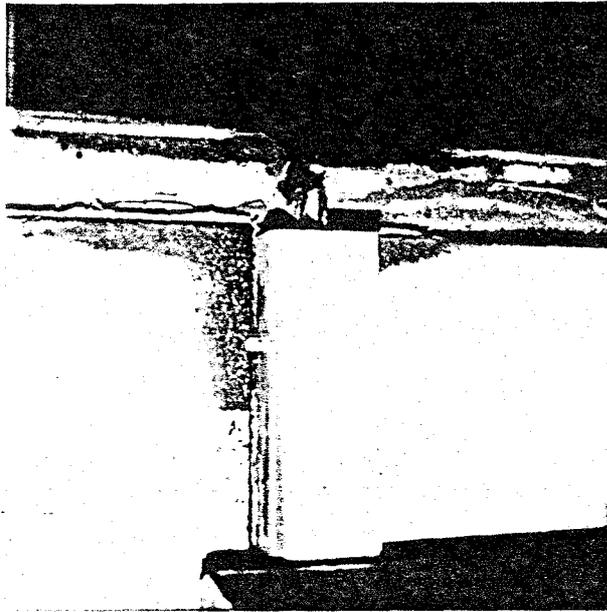


Abb. 4.0: Korrosion an der Unterkante von Fassadenelementen

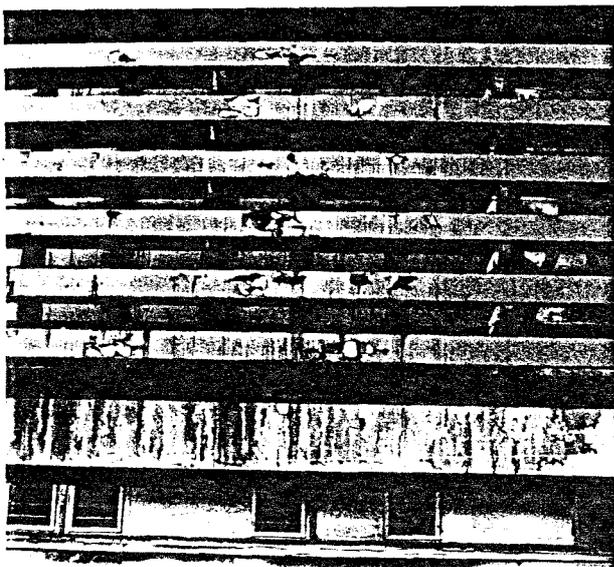
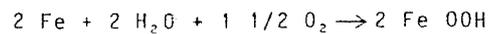


Abb. 4.1: Korrosion an beschichteter Oberfläche

Die Reaktionsgleichung wird vereinfacht so beschrieben:



Die entstandene Rostschicht kann die weitere Korrosion behindern, jedoch nicht verhindern.

4.1.1 Erscheinungsbilder

Atmosphärische Luftverunreinigungen, vor allem Schwefeldioxid (SO_2) nehmen bei gleichzeitiger Einwirkung von Feuchtigkeit Einfluß auf die Geschwindigkeit der atmosphärischen Korrosion. Die entstehenden Schäden sind augenscheinlich nicht von den atmosphärischen Korrosionsschäden zu unterscheiden, bei denen ein Einwirken von Luftverunreinigungen nicht stattgefunden hat.

Die Korrosionsschäden sind an der Oberfläche von beschichteten und unbeschichteten Stahlbauteilen durch Schichtdickenverluste des konstruktiven Querschnitts nachweisbar. Sie zeigen sich in einer lockeren, porösen Rostschicht, die sich im Laufe der Zeit in den Bauteilquerschnitt fortsetzt und zu dessen vollständiger Zerstörung führen kann. Die Farben der Rostschicht, orange, dunkelbraun, rot, schwarz, grün oder weiß, ist je nach Zusammensetzung des Rostes unterschiedlich.

Die Korrosion von Stahl führt je nach den Angriffsbedingungen zu unterschiedlichen Erscheinungsbildern:

- beim Idealfall einer gleichmäßigen Berührung der Oberfläche kommt es zur ebenmäßigen Korrosion
- unterschiedliche Korrosionsbedingungen führen zu einer narbenförmigen Korrosion (Lochfraß)
- örtlich unterschiedliche Korrosionswiderstände können zur interkristallinen Korrosion (Korngrenzkorrosion) bzw. zur transkristallinen Korrosion des Eisens/Stahls führen.

4.1.2 Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen

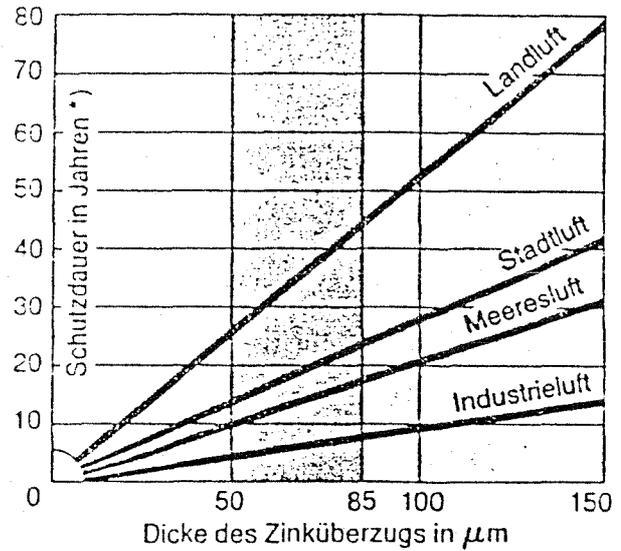
Die Luftverunreinigung wird als eine Einflußgröße der atmosphärischen Korrosion angesehen, die den Alterungsprozeß von Stahlbauteilen stark beschleunigen kann. In der Fachliteratur wird besonders das Einwirken von Schwefeldioxid (SO_2) benannt, wobei jedoch eine Beteiligung anderer, vorwiegend saurer Schadstoffe (Kohlensäure, Stickoxide u. a.) nicht ausgeschlossen wird.

Schwefeldioxid

Die schädigende Wirkung von Schwefeldioxid (SO_2) ist in zahlreichen Untersuchungen nachgewiesen worden. Sie zeigt sich besonders in den Schichtdickenverlusten der Zinkbeschichtung. Der Schichtdickenverlust in belasteten Gebieten wird mit den in weniger belasteten Gebieten verglichen. Die folgenden Tabellen sollen die Ergebnisse solcher Untersuchungen verdeutlichen:

Beanspruchung außen a, innen i		Durchschnittswerte in μm	Mittelwerte in μm
a	Landluft	1,3– 2,5	1,9
	Stadtluft	1,9– 5,2	3,5
	Industrieluft	6,4– 13,8	10,1
	Meeresluft	2,2– 7,2	4,7
i	—	—	1,5

Abb. 4.2: Jährliche Abtragungswerte für Zink in μm , aus DTSV (16).



*) bei Zugrundelegung der Abtragungsmittelwerte

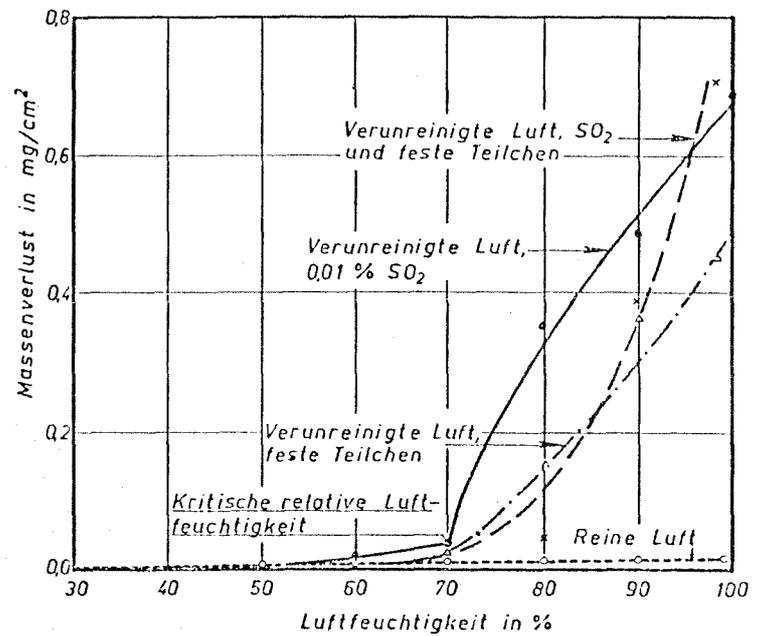
Abb. 4.3: Schutzdauer von Zinküberzügen, aus DTSV (16).

Die Tabellen 4.2 und 4.3 zeigen, daß die Abtragungsarten von Zinküberzügen in belasteten Gebieten deutlich höher liegen als in der Landatmosphäre, und deshalb von ihnen eine geringere Schutzdauer zu erwarten ist.

	normale Landluft	Industrieluft		
		leicht	mittel	stark
Brückenbauten	30	25	20	15 Jahre
Hochbau (außen)	16	13	10	8 Jahre
Masten	25	20	15	10 Jahre

Abb. 4.4: Übliche Schutzdauer von Korrosionsschutz-Beschichtungen (aus: v. Oeteren, 65, Seite 36)

Tabelle 4.4 weist auf die verkürzte Schutzdauer von Korrosionsschutz-Beschichtungen in stärker belasteten Gebieten hin.



nach VERNON

Abb. 4.5: Atmosphärische Korrosion des Eisen,
(aus: Wesche, 84, Seite 228).

Tabelle 4.5 weist auf den deutlich höheren Masseverlust von Eisen bei Korrosion in verunreinigter Atmosphäre hin, besonders ab der kritischen relativen Luftfeuchtigkeit von 70 %.

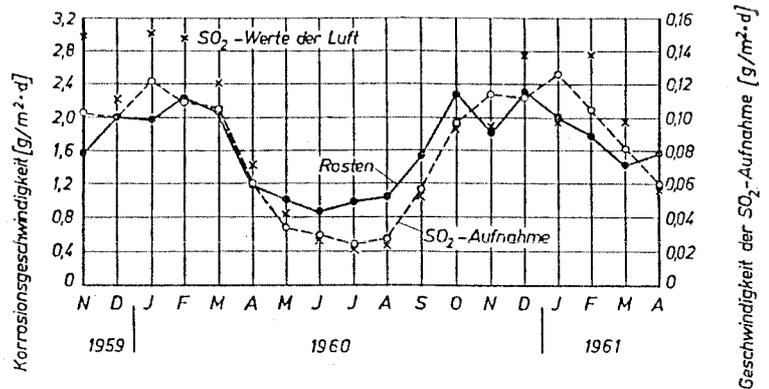


Abb. 4.6: Monatliches atmosphärisches Rosten und Schwefeldioxid-Aufnahme rostenden Eisens in Stuttgart (nach Schikorr, aus: Wesche, 84, Seite 229)

Tabelle 4.6 weist auf die hohe Korrelation zwischen der SO_2 -Aufnahme und der Korrosionsgeschwindigkeit hin. Hier wird die höhere Korrosionsrate in den Wintermonaten bei steigendem SO_2 -Emissionen besonders gut erkennbar.

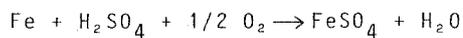
Atmosphärentyp	Korrosionsverlust $\mu\text{m}/\text{Jahr}$
Landluft	5... 70
Stadtluft	30... 80
Industrieluft	40... 170
Meeresluft	60... 250

Abb. 4.7: Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl in verschiedenen Atmosphärentypen (aus: Wesche 84, Seite 231).

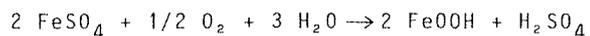
Die Abhängigkeit der Korrosionsverluste von den verschiedenen Atmosphärentypen wird in Tabelle 4.7 deutlich.

Die Liste solcher Untersuchungsergebnisse läßt sich noch erweitern. Ohne auf die Aussage der Tabellen im einzelnen näher einzugehen, belegen sie eine hohe Korrelation von SO_2 -Gehalt der Atmosphäre und Korrosion bzw. Schichtdickenverlust von Eisen, Stahl und Überzügen. Die aufgezeigte Differenz der einzelnen Atmosphärentypen zum Schichtdickenverlust der Landatmosphäre ergibt einen quantitativen Anhaltswert zur schädigenden Wirkung von SO_2 sowie über eine zu erwartende Reduzierung der Lebensdauer von Stahlkonstruktionen.

Chemisch verläuft die schädigende Einwirkung von Schwefeldioxid auf Bauteile aus Eisen und Stahl über die sich an der Atmosphäre bei Anwesenheit von Feuchtigkeit bildende Schwefelsäure. Sie reagiert mit Eisen (Fe) zu Eisensulfat (FeSO_4) nach folgender Gleichung:



In einer zweiten Stufe entsteht Eisenhydroxid (FeOOH)



Wichtig ist hierbei, daß als Endprodukt der Reaktion nicht nur Rost, sondern wiederum Schwefelsäure (H_2SO_4) entsteht, die den Korrosionsvorgang weiter aufrecht halten kann.

Beschichtungen und Überzüge haben die Aufgabe, Stahlbauteile vor Korrosion zu schützen. Wie jedoch die Tabellen 4.2, 4.3 und 4.4 zeigen, sind auch sie in verunreinigter Atmosphäre deutlichen Schichtdickenverlusten unterworfen, wodurch sich ihre Lebensdauer erheblich reduziert.

Ganz besonders betroffen sind Beschichtungen, wenn sie in Gegenwart von Schwefeldioxid (SO_2) trocknen. Je nach chemischer Zusammensetzung der Beschichtungsstoffe (z. B. Ölbasis) und Schwefeldioxidkonzentration verzögert sich ihre Trocknung oder kann ganz verhindert werden.

Als praktische Konsequenz ergibt sich aus diesen Überlegungen, daß korrosionsschützende Überzüge oder Beschichtungen in belasteten Gebieten eine geringere Lebensdauer besitzen und wesentlich öfter erneuert werden müssen. Bei vereinzelt in der Fachliteratur anzutreffenden quantitativen Aussagen (Heinz, 44) über einen 4-5-fach höheren Schichtdickenabtrag in be-

lasteten Gebieten ist jedoch zu berücksichtigen, daß die mikroklimatischen Verhältnisse am einzelnen Bauwerk auch zu anderen Ergebnissen führen können.

Partikelförmige Luftverunreinigungen

Partikelförmige Luftverunreinigungen in Form von Staub und Ruß bewirken ein Verschmutzen der ihnen ausgesetzten Bauteiloberflächen. Dies trifft auch auf Oberflächen von Stahlbauteilen zu. Die Verschmutzungen der Bauteiloberfläche, die oft besonders deutlich an der regen- und windabgewandten Seite zu beobachten sind, führen mit den Jahren zu einem unregelmäßigen Verschmutzungsgrad und beeinträchtigen die Erscheinungsbilder von Gebäuden.

Für die ungleichmäßigen Schmutzablagerungen an Konstruktionselementen und Fassadenoberflächen können folgende Gründe aufgeführt werden:

- Belastung durch den makroklimatischen Atmosphärentyp
- Mikroklimatische Belastung (Lage zu lokalen Emittenten):
- Exposition des Bauteils:
Dem Regen ausgesetzte Teile sind geringer verschmutzt als die geschützten.
- Ablaufendes Regenwasser:
An Fassaden ablaufendes Regenwasser kann entweder reinigen oder dunkle Schmutzfahnen ausbilden.

Eine schädigende Wirkung auf die Bausubstanz kann vom Staub ausgehen, wenn die Ablagerungen gasförmige Luftverunreinigungen adsorbieren. Die Staubablagerung kann dann je nach Schadstoffgehalt und Feuchtigkeitsangebot als Katalysator bei der Bildung von Säuren oder als ätzende Kompressen auf der Bauteiloberfläche zerstörend wirken. Das Ausmaß dieser Schädigungsmöglichkeit auf Bauteile aus Eisen und Stahl ist bisher nicht abgeschätzt worden. Neben dieser schädigenden Wirkung weist van Oeteren (63) auf eine gewisse schützende Wirkung von Staubablagerungen auf Beschichtungen hin. So können Schmutzablagerungen in der Industrielatmosphäre die für die Haltbarkeit von Beschichtungen nachteilige UV-Strahlung stark reduzieren.

4.1.3 Nachbesserung

Die Nachbesserungsarbeiten an Bauteilen aus Eisen und Stahl, die aufgrund des korrosiven Einwirkens von Luftverunreinigungen notwendig werden, unterscheiden sich grundsätzlich nicht von denen, die bei atmosphärischer Korrosion ausgeführt werden müssen. Sie sind in zahlreichen Veröffentlichungen zum Thema des Korrosionsschutzes ausführlicher und umfangreicher beschrieben als es an dieser Stelle erfolgen kann. Der Umfang der Nachbesserungsarbeiten richtet sich nach dem Ausmaß der Korrosionsschäden. Bei einem geringeren Schaden ist oft die Reinigung, Vorbehandlung und anschließende Erneuerung der Beschichtung ausreichend. Ist die Korrosion bereits soweit fortgeschritten, daß die Standicherheit des Bauteils, der Konstruktion oder des Gebäudes nicht mehr gewährleistet ist, ist ein vollständiger Austausch der korrodierten Teile erforderlich.

Eine bedeutende Rolle kommt den Instandhaltungsmaßnahmen von Bauteilen aus Eisen und Stahl zu. Hier zeigen die Versuchsergebnisse, daß korrosionsschützende Überzüge und Beschichtungen in Regionen mit hohen Schadstoffbelastungen wesentlich öfter erneuert werden müssen, um ihre schützende Funktion behalten und Korrosionsschäden vermeiden zu können.

Beispiele von Verschmutzungen durch partikelförmige Luftverunreinigungen an Außenbauteilen aus Stahl weisen darauf hin, daß sich entstehende Schmutzfahnen konstruktiv durch die Ausbildung von Tropfkanten verhindern lassen. Bei starken Beanspruchungen sind die Tropfkanten ggf. nachträglich anzuordnen.

4.1.4 Zusammenfassung

Die im Hochbau verwendeten Eisen- und Stahlbauteile sind besonders an der Atmosphäre einem natürlichen Alterungsprozeß unterworfen, der an Korrosionserscheinungen sichtbar wird. Die Lebensdauer dieser Bauteile wird durch die Korrosion bestimmt und ist von der schützenden Wirkung der Beschichtungen und Überzüge abhängig. Luftverunreinigungen in Form saurer Atmosphärien, Staub und Ruß, beschleunigen die Korrosion, was am Beispiel des Schwefeldioxids (SO_2) seit Jahren nachgewiesen ist. Untersuchungen an beschichteten und unbeschichteten Stahlbauteilen in verschiedenen Atmosphärentypen nach DIN 55 928, Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungen und Überzüge, (9) zeigen in den Belastungsgebieten deutlich höhere Schichtdickenverluste an der Oberfläche des Stahls bzw. der Beschichtung auf, als in unbelasteten Gebieten. So weisen die vom Umweltbundesamt (78) herausgegebenen Zahlen auf einen etwa 5-fach höheren Schichtdickenverlust von ungeschütztem und verzinktem Stahl in Industrielatmosphäre gegenüber Landatmosphäre hin. Die hohen Abtragungsraten lassen eine geringere Lebensdauer der angegriffenen Bauteile erwarten und führen zu deutlich erhöhten Nachbesserungs- und Instandhaltungsmaßnahmen.

Dieser Vergleich der Schichtdickenverluste in verschiedenen Atmosphärentypen gibt einen ersten groben Anhaltswert für eine quantitative Erfassung der durch Luftverunreinigung hervorgerufenen Schäden. Dieser Wert ist jedoch aufgrund

- der Wechselwirkung mikroklimatischer Einflußgrößen,
- der unterschiedlichen Oberflächenbeschichtungen und
- der unterschiedlichen Exposition und Anwendung des Werkstoffs

großen Schwankungen unterworfen.

4.2 Aluminium

Aluminiumbauteile finden aufgrund ihres geringen Gewichtes bei zugleich hoher Festigkeit vielfältige Anwendungsmöglichkeiten im Bauwesen. Die Vielzahl der Einsatzmöglichkeiten von Aluminium zeigt sich in der Verwendung als

- Wandbekleidungen und Fassadenkonstruktionen
- Dacheindeckungen
- Fenster- und Türprofile
- Profile und Bleche für Randanschlüsse, Abdeckungen u. a.

Je nach Anforderung werden sie mit unbehandelter, anodisch oxidiert, kunststoffbeschichteter oder emaillierter Oberfläche eingesetzt.

Bei der Anwendung von Aluminiumbauteilen an der Atmosphäre zeigen sie in der Regel eine hohe Witterungsbeständigkeit, obwohl Aluminium in der elektrochemischen Spannungsreihe einen noch ungünstigeren Platz als Eisen einnimmt. Das liegt an der dünnen Aluminiumoxidschicht (Al_2O_3), die bei der Lagerung von unbehandeltem Aluminium an der Atmosphäre einen dichten und festen Haftverbund mit der Oberfläche bildet und sie vor weiteren Korrosion schützt. Diese Schutzschicht ist in der Lage, sich bei mechanischer Beschädigung zu regenerieren. Durch die anodische Oxidation (Eloxieren) kann diese Schutzschicht in größerer und gleichmäßigerer Dicke und höherer Dichte auch künstlich erzeugt werden.

Der qualitative Verlauf der Kurvenform in Abb. 4.8 zeigt die atmosphärische Korrosion des Aluminiums. Deutlich erkennbar ist der zu Beginn (6 - 12 Monate) verhältnismäßig schnell steigende Zuwachs der Korrosion, der anschließend merklich langsamer wird. Die schützende Korrosionsschicht nimmt unter dem Einfluß der Außenatmosphäre zu und wächst bis auf etwa $0,1 \mu m$ an.

Auch die anodisch erzeugten Oxidschichten (Eloxalschichten) sind, sofern sie entsprechend DIN 17 611 (5) hergestellt werden, gegen atmosphärische Einwirkungen beständig. Die Schutzschicht soll eine Dicke von mind. $20 \mu m$ aufweisen. Durch die Verwendung bestimmter Aluminiumlegierungen (z. B. Legierungen mit Magnesium, Mangan, Chrom) kann der Korrosionswiderstand des Aluminiums gegenüber atmosphärischen Beanspruchungen (z. B. Seeklima, Industrieatmosphäre) noch verbessert werden.

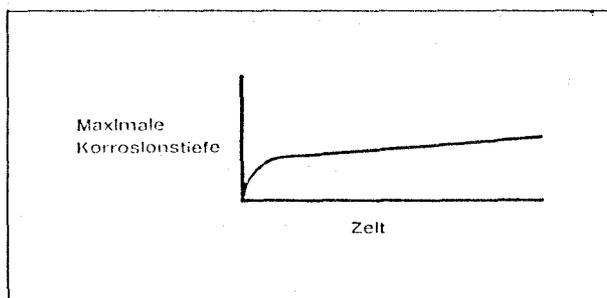


Abb. 4.8: Verlauf der atmosphärischen Korrosion bei Aluminium (aus: Godard, 105)

Diese günstigen Eigenschaften des Aluminiums führen bei einer fachgerechten Anwendung und Verarbeitung (Vermeidung der galvanischen oder der Ribkorrosion) zu einer sehr hohen Lebensdauer von Aluminiumbauteilen, wie zahlreiche Beispiele (Dach der Westfalenhalle in Dortmund, Eros Statue auf dem Picadilly Circus in London u. a.) belegen.

4.2.1 Erscheinungsbilder

Die wachsende Immissionsbelastung zeigt jedoch auch auf Aluminiumbauteilen ihre Wirkung. So treten verstärkt Korrosions- und Verschmutzungserscheinungen auf. Sie haben folgendes Aussehen:

Die Oberflächen unbehandelter Aluminiumbauteile sind rau und weisen deutliche Stippenbildung auf. Dies sind warzenförmige Stellen verstärkter Korrosion.

Auf der Oberfläche anodisch oxidierten Aluminiumbauteile ist ein Aufrauen der Oberfläche festzustellen. Weiße Farbausblühungen werden erkennbar. Im Laufe zunehmender Korrosion kann es zu deutlichen Farbtonänderungen kommen.

Starke Schmutzablagerungen der Oberfläche führen mit der Zeit zu festhaftenden Verkrustungen. Die Oberfläche des Aluminiums wird rau, fleckig und schlierig.

4.2.2 Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen

Die gute Witterungsbeständigkeit des Aluminiums und seiner Legierungen macht es schwierig, den Einfluß aggressiver Luftverunreinigungen eindeutig zu bestimmen. Allgemein kann nach Untersuchungen von Aluminiumbauteilen in belasteten und unbelasteten Gebieten davon ausgegangen werden, daß der Korrosionsprozeß in belasteten Gebieten (Industrieatmosphäre, Meeresatmosphäre) verstärkt auftritt. Grundsätzlich läßt sich der Einfluß von Luftverunreinigungen aus der chemischen Widerstandsfähigkeit des Aluminiums ableiten. Aluminium reagiert amphoter, d. h. es reagiert empfindlich auf Säuren mit einem pH-Wert $< 4,5$ und Alkalien mit einem pH-Wert $> 8,5$. Werden diese Grenzwerte überschritten, erfolgt eine Auflösung der Oxidschicht und es kann zu punktförmigen Angriffen kommen.

Saure Atmosphärrilien

Zu den Luftverunreinigungen zählen in erster Linie die sauren Atmosphärrilien (Schwefeldioxid, Stickoxid, Kohlendioxid u. a.). Eine Beschädigung der Aluminiumoxidschicht (Al_2O_3) kann von ihnen hervorgerufen werden, wenn ihre Säuren (z. B. Schwefelsäure (H_2SO_4)) den angegebenen Grenzwert ($pH < 4,5$) unterschreiten. Dies erscheint bei den heute angegebenen pH-Werten des sauren Regens möglich, jedoch selten der Fall zu sein. Gefährlicher sind hier Staubablagerungen auf Aluminiumbauteilen, die in Verbindung mit geringen Feuchtigkeitsmengen (Nebel, Tauwasser) stark konzentrierte Säuren bilden können und die Aluminiumoxidschicht verletzen. Das Ausmaß dieser schädigenden Einwirkung ist neben der Konzentration von der Dauer der Einwirkung abhängig.

So kann es trotz guter Korrosionsbeständigkeit des Aluminiums besonders in Industrieatmosphären zu Schäden infolge des Einwirkens saurer Atmosphärrilien kommen. Auf den nachteiligen Einfluß von Schwefeldioxid (SO_2) weist auch Godard (105) hin, der feststellt, daß die Säurereaktion bei Aluminium "eine bestimmte Korrosion und einen allmählichen Festigkeitsverlust nach längerer Zeit" hervorruft.

Partikelförmige Luftverunreinigungen

Partikelförmige Luftverunreinigungen in Form von Staub und Ruß bewirken ein Verschmutzen der ihnen ausgesetzten Bauteiloberflächen. Dies trifft auch auf Oberflächen von Aluminiumbauteilen zu. Besonders betroffen sind hiervon die unbehandelten Aluminiumoberflächen, bei denen Schmutzablagerungen an der rauhen Oberfläche gut haften bleiben. Die Verschmutzungen der Bauteiloberfläche, die oft besonders deutlich an der regen- und windabgewandten Seite zu beobachten sind, führen mit den Jahren zu einem unregelmäßigen Verschmutzungsgrad und beeinträchtigen das Erscheinungsbild eines Gebäudes. Für die ungleichmäßigen Schmutzablagerungen an Bauteilen und Fassadenoberflächen aus Aluminium können folgende Gründe aufgeführt werden:

- Belastung durch den makroklimatischen Atmosphärentyp;
- Mikroklimatische Belastung (Lage zu lokalen Emittenten);
- Exposition des Bauteils:
Dem Regen ausgesetzte Teile sind geringer verschmutzt als die geschützten;
- Ablaufendes Regenwasser:
An Fassaden ablaufendes Regenwasser kann entweder reinigen oder dunkle Schmutzfahnen ausbilden.

Eine schädigende Wirkung auf die Bausubstanz kann vom Staub ausgehen, wenn die Ablagerungen gasförmige Luftverunreinigungen adsorbieren. Die Staubablagerung kann dann je nach Schadstoffgehalt und Feuchtigkeitsangebot als Katalysator bei der Bildung von Säuren oder als ätzende Kompresse auf der Bauteiloberfläche zerstörend wirken. Das Ausmaß dieser Schädigungsmöglichkeit auf Bauteile aus Aluminium ist bisher nicht abgeschätzt worden.

4.2.3 Nachbesserung

Aufgrund der guten Witterungsbeständigkeit von Aluminiumbauteilen müssen bei fachgerechter Anwendung nur wenig Nachbesserungsarbeiten aufgrund von Witterungseinflüssen und aggressiven Umweltbelastungen durchgeführt werden.

Bei den behandelten Aluminiumbauteilen ist vor allem bei den organischen Beschichtungen auf mögliche Schichtdickenverluste (vgl. Kap. 4.1 und 3.3) zu achten, und der Anstrich ist ggf. rechtzeitig zu erneuern. Erreicht unter ungünstigen Bedingungen bei stark saurem Angriff die Korrosion das Grundmetall, setzt sich die Korrosion dort fort, und die Schäden sind nicht mehr zu beseitigen.

Als vorbeugende Maßnahme gegenüber der wachsenden Immissionsbelastung wird empfohlen (11), eine regelmäßige Reinigung durchzuführen. Je nach dem Grad der Verschmutzung sind Reinigungsintervalle festzulegen und geeignete Reiniger auszuwählen. Dies betrifft in erster Linie die anodisierten und kunststoffbeschichteten Aluminiumbauteile, deren Funktionsfähigkeit durch die Schadstoffbelastung zwar nicht gefährdet erscheint, eine regelmäßige Reinigung jedoch unter folgenden Gesichtspunkten sinnvoll ist:

- Erhaltung des Erscheinungsbildes
- Vorbeugung gegenüber möglichen Schmutzablagerungen, deren Inhaltsstoffe in Verbindung mit Feuchtigkeit schädigende, stark konzentrierte Säuren (z. B. Schwefelsäure) bilden können.
- Neben der Erhaltung des Erscheinungsbildes kann durch eine regelmäßige Reinigung der Aluminiumoberfläche deren Lebensdauer verlängert werden. Dies betrifft besonders die anodisierten Oberflächen, bei denen nach unterlassener Reinigung nach 10 Jahren mit örtlicher Korrosion (Ausblühungen) zu rechnen ist.

4.2.4 Zusammenfassung

Bauteile aus Aluminium zeichnen sich bei fachgerechter Planung und Anwendung durch eine gute Witterungsbeständigkeit aus. Das gilt für unbehandelte Aluminiumoberflächen, bei denen sich eine schützende Oxidschicht (Al_2O_3) bildet, ebenso wie für beschichtete Oberflächen (anodisch oxidiert, kunststoffbeschichtet oder emailliert).

Saure Luftverunreinigungen beschleunigen grundsätzlich die Korrosionsgeschwindigkeit, wirken jedoch nur dann schädigend, wenn die Schutzschicht zerstört wird. Dies geschieht, wenn das angreifende Medium einen pH-Wert $< 4,5$ besitzt. Das ist bei den heute angegebenen pH-Werten des sauren Regens möglich, jedoch selten der Fall. Gefährlicher wirken sich Staubablagerungen aus, deren Inhaltsstoffe in Verbindung mit Feuchtigkeit (Nebel, Tauwasser) stark konzentrierte Säuren bilden und die natürliche sowie die anodisch oxidierte Schutzschicht zerstören können, und zu einer Korrosion des Grundmetalls führen.

Bei organisch beschichteten Aluminiumoberflächen hängt die Widerstandsfähigkeit des Aluminiums direkt von der Beschichtung ab. Auf mögliche Beschädigungen und Schichtdickenverluste von Beschichtungen wurde bereits hingewiesen (vgl. Kap. 4.1 und 3.3), so daß auch hier in den belasteten Gebieten eine frühzeitige Erneuerung der Beschichtung notwendig wird.

Partikelförmige Luftverunreinigungen führen neben der beschriebenen möglichen sauren Einwirkung auch auf Bauteile aus Aluminium zu objektbezogenen und von der Immissionsbelastung abhängigen Verschmutzungen, die das Erscheinungsbild des Bauwerks beeinträchtigen. Im Laufe der Zeit können sich aus den Schmutzablagerungen fest haftende Verkrustungen bilden.

Um den beschriebenen Einwirkungen aus der wachsenden Immissionsbelastung vorzubeugen, wird vom Beratungs- und Informationsdienst der Aluminiumindustrie (11) empfohlen, an Aluminiumbauteilen, die der Witterung ausgesetzt sind, eine regelmäßige Reinigung mit geeigneten, auf Verschmutzung und Oberfläche abgestimmten Reinigungsmitteln, durchzuführen.

4.3 Zink und Titanzink

Bauteile aus Zink, Titanzink und Zinküberzüge haben sich in der Baupraxis bewährt. Im Außenbereich finden sie Verwendung für

- Außenwandbekleidungen,
- Dacheindeckungen,
- Dachrinnen u. a. Blechteile des Daches,
- Mauer- und Gesimsabdeckungen.

Je nach Anforderung kann auf die Oberfläche von Bauteilen aus Zink und Titanzink eine Beschichtung aufgetragen werden.

Zinkbauteile weisen bei der Anwendung im Außenbereich in der Regel eine hohe Witterungsbeständigkeit auf. An der Atmosphäre findet bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von mehr als 70 % eine beschleunigte Korrosion statt. Sie bildet auf der Zinkoberfläche eine matte, graublaue, wasserunlösliche Patina, die im wesentlichen aus basischem Zinkkarbonat besteht. Diese Schutzschicht ist in der Lage, die Zinkoberfläche vor weiterer Korrosion zu schützen und kann sich bei mechanischen Beschädigungen regenerieren. Durch Witterungseinflüsse wird diese schützende Patina langsam oberflächlich abgetragen. Bei gleichzeitiger Neubildung der Schutzschicht erfolgt so ein kontinuierlicher Zinkverbrauch, der die Lebensdauer von Zinkbauteilen bestimmt. Die Abtragsrate ist dabei von folgenden Faktoren abhängig:

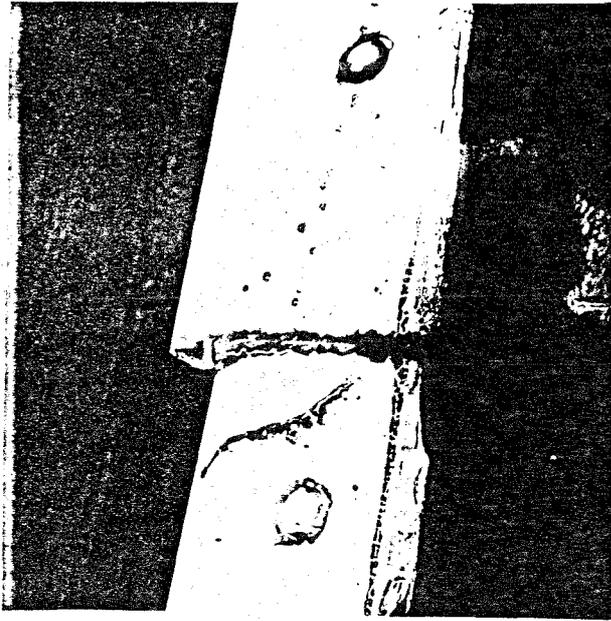
- Häufigkeit und Dauer des Feuchtigkeitskontaktes
- Trocknungsgeschwindigkeit
- Ausmaß der Luftverunreinigungen

Den Einfluß dieser Faktoren belegen zahlreiche Versuchsergebnisse (Schikorr u. a.), so daß die Zinkberatung (23) in Abhängigkeit vom makroklimatischen Atmosphärentyp mit folgender Lebensdauer bei Bauteilen aus Zink rechnet:

Landluft	100 Jahre
Meeresluft mindestens	50 Jahre
feuchte Stadtluft mindestens	60 Jahre
feuchte Industrieluft mindestens	20 Jahre

Diese Angaben beziehen sich auf eine Materialstärke von 0,70 mm, sowie auf die volle Erhaltung der Funktionsfähigkeit (Halbwertdicke) und setzen eine fachgerechte Planung und Anwendung voraus.

4.3.1 Erscheinungsbilder



Luftverunreinigungen zeigen auch bei Bauteilen aus Zink und Titanzink ihre Wirkung. Sie beschleunigen das Korrosionsverhalten und verstärken die Verschmutzungserscheinungen. Sie können folgendes Aussehen haben:

An Verwahrungen und Regenrinnen zeigen sich narbig angefressene Durchrostungserscheinungen, deren Oberfläche sich leicht entfernen läßt. Einige Stellen sind vollständig durchlöchert. Durch diese Durchlöcherungen kann Regenwasser in angrenzende Bauteile eindringen und führt dort zu Durchfeuchtungserscheinungen.

Unterhalb der Einlaufstellen von Dachdeckungen sind örtliche Anfressungen und Durchlöcherungen der Dachrinne erkennbar.

Abb. 4.9: Korrodiertes Zinkabdeckblech



Abb. 4.10: Korrodierte Zinkdachrinne
(Bitumenkorrosion)

4.3.2 Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen

Auf den schädigenden Einfluß von Luftverunreinigungen auf Bauteilen aus Zink weist Schikorr (71) hin. Aus seinen Ausführungen geht hervor, daß schon in Untersuchungen der 30er und 40er Jahre auf die hohe Korrelation zwischen dem Schwefeldioxidgehalt der Luft und der Korrosionsgeschwindigkeit hingewiesen wird. Je nach makroklimatischen Bedingungen (Atmosphärentyp) ergeben sich Abtragungsraten für Zink, die sich nach Witt (87) in folgenden Grenzwerten bewegen:

Landatmosphäre	0,4 - 5 µm/Jahr
Stadtatmosphäre	1,6 - 7 µm/Jahr
Industrieatmosphäre	3,4 - 41 µm/Jahr
Meeresatmosphäre	0,6 - 15 µm/Jahr

Die mikroklimatischen Bedingungen und die Exposition des Bauteils sind für die Schwankungsbreite der Abtragungsraten in den einzelnen Atmosphärentypen von ausschlaggebender Bedeutung.

Ein entscheidendes Kriterium für die Beurteilung des Einflusses von Luftverunreinigungen auf Bauteile aus Zink ist die chemische Widerstandsfähigkeit. So weist Zink im pH-Bereich von etwa 6 - 12,5 eine gute Beständigkeit auf. Das bedeutet, daß sich saure Niederschläge, die deutlich niedrigere pH-Werte als 6 erreichen, schädigend auf Zink einwirken.

Schwefeldioxid gilt als der eigentliche Indikator von Luftverunreinigungen, aber auch die schädigende Wirkung von partikelförmigen Luftverunreinigungen ist bekannt. Andere mögliche Verunreinigungen der Luft wie Stickstoffoxide, Chlorwasserstoff, Schwefelwasserstoff, Essigsäure, Salzsäure u. a. wirken ebenfalls korrosionsbegünstigend auf Zink, wobei nähere Untersuchungen über ihren Anteil an der gesamten atmosphärischen Korrosion bisher nicht vorliegen.

Schwefeldioxid

Schwefeldioxid (SO_2) ist die für die atmosphärische Korrosion des Zinks wichtigste Luftverunreinigung. Ab einer relativen Luftfeuchtigkeit von etwa 70 % ist SO_2 nach Schikorr (71) für die atmosphärische Zinkkorrosion maßgebend (vgl. auch Tab. 4.5). Die Korrosion verläuft bis zu einer relativen Luftfeuchtigkeit von 85 % etwa proportional der vom Zink aufgenommenen Schwefeldioxidmenge (vgl. Abb. 4.9). Schwefeldioxidhaltige Luftverunreinigungen sind in der Lage, an der

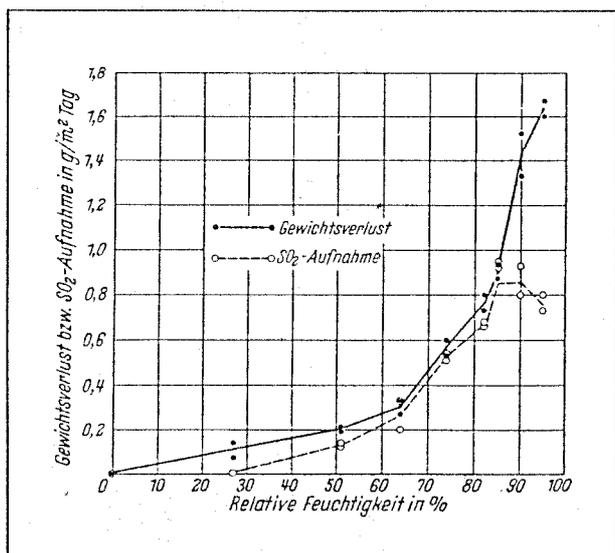
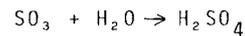
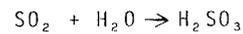


Abb.4.11: Schwefeldioxidaufnahme und Korrosion des Zinks in 3 Tagen bei Einwirkung schwefeldioxidhaltiger Luft (13,5 mg/l SO_2 je Tag) in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit (aus: Schikorr, 71)

Atmosphäre in Verbindung mit Feuchtigkeit schwefelige Säure (H_2SO_3) und Schwefelsäure (H_2SO_4) zu bilden.



Während die basische Schutzschicht in der Lage ist, leichte Ansäuerungen des Regenwassers zu neutralisieren, greifen konzentrierte Säuren die Schutzschicht an und können sie zerstören. An den angegriffenen Stellen kommt es zur Bildung eines Zinksulfits, das schnell zu Sulfat oxidiert und vom Regenwasser leicht abgetragen werden kann. Dieser Vorgang baut die Schutzschicht bis zu ihrer vollständigen Auflösung kontinuierlich ab.

Besonders ungünstige Voraussetzungen bieten Tau und Nebel in Industrieatmosphären, deren geringe Feuchtigkeitsmengen in Verbindung mit sauren Staubniederschlägen einen besonders niedrigen pH-Wert aufweisen und durch ihren Angriff die Bildung einer Schutzschicht verhindern können. Betroffen sind hier vor allem waagrecht verlaufende Abdeckungen sowie Dachrinnen, bei denen es aufgrund des konzentrierten Angriffs zu örtlichen Durchrostungen und folglich zu Durchfeuchtungen der angrenzenden Bauteile kommen kann.

Das schädigende Einwirken von Schwefeldioxid und anderen Luftverunreinigungen auf Bauteile aus Zink wird quantitativ in den oben beschriebenen Abtragungsraten erfaßt. Danach ist als praktische Konsequenz mit zum Teil mehrfach höheren Abtragungsraten in verunreinigter Atmosphäre zu rechnen, die dazu führen, daß Bauteile aus Zink und Zinkbeschichtungen in den belasteten Gebieten wesentlich früher nachgebessert werden müssen. Zahlenwerte über die zusätzlich notwendigen Nachbesserungsarbeiten in den einzelnen Atmosphärentypen lassen sich bei gleichen Ausgangsbedingungen unmittelbar aus den Abtragungsraten ablesen. In der Praxis können jedoch die mikroklimatischen Bedingungen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Einen Sonderfall der sauren Einwirkung von Atmosphäriken auf Zink, aber auch auf andere Metalle, stellt die unter dem Stichwort der Bitumenkorrosion bekannt gewordene Schädigung an Dachentwässerungssystemen dar. Hierbei sind oft unregelmäßig auftretende Durchlöcherungen an Teilen von Dachrinnen und Regenfallrohren festgestellt worden, während andere Teile völlig unbe-

schädigt bleiben. Diese Zerstörungen werden auf die Bildung saurer Abbauprodukte des Bitumens (vgl. Kap. 5.2) an der Atmosphäre zurückgeführt, die zu örtlichen Zerstörungen des Dachentwässerungssystems führen können.

Partikelförmige Luftverunreinigungen

Partikelförmige Luftverunreinigungen in Form von Staub und Ruß bewirken ein Verschmutzen der ihnen ausgesetzten Bauteiloberflächen. Dies trifft auch auf Oberflächen von Bauteilen aus Zink und Titanzink zu. Die Verschmutzungen der Bauteiloberfläche, die oft besonders deutlich an der regen- und windabgewandten Seite zu beobachten sind, führen mit den Jahren zu einem unregelmäßigen Verschmutzungsgrad und können das Erscheinungsbild eines Gebäudes beeinträchtigen.

Für die ungleichmäßigen Schmutzablagerungen an Konstruktionselementen und Fassadenoberflächen können folgende Gründe aufgeführt werden:

- Belastung durch den makroklimatischen Atmosphärentyp
- Mikroklimatische Belastung
- Lage zu lokalen Emittenten
- Exposition des Bauteils:
 - Dem Regen ausgesetzte Teile sind geringer verschmutzt als die geschützten.
- Ablaufendes Regenwasser:
 - An Fassaden ablaufendes Regenwasser kann entweder reinigen oder dunkle Schmutzfahnen ausbilden.

Eine schädigende Wirkung auf die Bausubstanz kann vom Staub ausgehen, wenn die Ablagerungen gasförmige Luftverunreinigungen adsorbieren. Die Staubablagerung kann dann je nach Schadstoffgehalt und Feuchtigkeitsangebot als Katalysator bei der Bildung von Säuren oder als ätzende Kompressur auf der Bauteiloberfläche zerstörend wirken. Das Ausmaß dieser Schädigungsmöglichkeit auf Bauteile aus Zink und Titanzink ist bisher nicht abgeschätzt worden.

4.3.3 Nachbesserung

Aufgrund der guten Witterungsbeständigkeit von Bauteilen aus Zink und Titanzink müssen bei fachgerechter Anwendung nur wenige Nachbesserungsarbeiten aufgrund von Witterungseinflüssen und aggressiven Umweltbelastungen durchgeführt werden. Besonders zu beachten sind jedoch die Schichtdickenverluste von Beschichtungen auf Zinkbauteilen, so daß Beschichtungen in belasteten Gebieten häufiger erneuert werden müssen. Das gilt auch für Zinkbeschichtungen auf Stahlbauteilen, die ebenfalls in den aggressiveren Industriegebieten höhere Schichtdickenverluste aufweisen. Hier kann z. B. bei starker Beanspruchung der Oberfläche durch Luftverunreinigung durch ein Verzinken mit anschließender organischer Beschichtung die Lebensdauer der Oberflächenbeschichtung von Bauteilen verlängert werden.

Die Oberfläche von Bauteilen aus Zink bleibt in den meisten Fällen unbeschichtet. Erweist sich die Korrosionsrate der Oberfläche in aggressiven Medien sehr hoch (hoher Schichtdickenabtrag), so kann die Nutzungsdauer durch Schutzanstriche gegen Witterungseinflüsse, Bitumenkorrosion und gegen saure Atmosphären erhöht werden. Hat die Korrosion in besonders stark angegriffenen Bereichen (Dachrinnen, Dachrandverwahrung, Fensterbänke usw.) die Zinkoberfläche zerstört, so sind die beschädigten Teile in der Regel auszutauschen.

Um solchen Fällen vorzubeugen, ist es in erster Linie erforderlich, die Bauteile aus Zink, Titanzink und verzinktem Stahl konstruktiv zu schützen. Hierzu zählt

- die Ausbildung von Tropfkanten, um ein einwandfreies Abtropfen des Regenwassers zu gewährleisten;
- die Ausbildung eines Gefälles an Ein- und Abdeckungen, Randeinfassungen und Regenrinnen, um stehendes Regenwasser zu vermeiden und um Schmutzablagerungen abzuführen;
- der vorbeugende Auftrag und die regelmäßige Wartung bzw. Erneuerung einer Beschichtung.

4.3.4 Zusammenfassung

Bauteile aus Zink und Titanzink besitzen bei baustoffgerechter Planung und Anwendung eine gute Witterungsbeständigkeit. Bei den unbehandelten Oberflächen bildet sich eine schützende Schicht aus Zinkkarbonat, die den Untergrund vor weiterer Korrosion schützt. Durch die Schutzschicht besitzt Zink eine chemische Widerstandsfähigkeit im pH-Bereich von 6 bis 12,5. Luftverunreinigungen wirken dann schädigend, wenn sie die Schutzschicht zerstörend angreifen bzw. ihre Ausbildung verhindern.

Saure Atmosphären, von denen bisher Schwefeldioxid als eindeutiger Indikator nachgewiesen wurde, greifen die Zinkoberfläche ab einer relativen Luftfeuchtigkeit von etwa 70 % an. Über die Bildung von leichtlöslichem Zinksulfat kommt es zum kontinuierlichen Abtrag der Oberfläche. Untersuchungen über Vergleiche des Schichtdickenabtrags in belasteten und unbelasteten Atmosphärentypen belegen, daß Luftverunreinigungen, vor allem Schwefeldioxid, zu einer hohen Beschleunigung des Korrosionsvorgangs beitragen. Die Luftverunreinigungen können dazu führen, daß sich die Lebensdauer von Zinkbauteilen in nicht schadstoffbelasteten Regionen um den 5-fachen Wert erhöht. Die Folgen sind eine reduzierte Nutzungsdauer sowie ein erhöhter Aufwand für Instandhaltungs- und Nachbesserungsarbeiten vorwiegend in Stadt- und Industriemosphäre.

4.4 Kupfer

Kupfer ist das edelste der im Bauwesen verwendeten Metalle. Es zeichnet sich durch seine hohe Lebensdauer, seine leichte Verarbeitbarkeit und gute Festigkeitseigenschaften aus. Der Witterung ausgesetzt, findet Kupferblech Verwendung für

- Fassadenbekleidungen,
- Dacheindeckungen,
- Rinnen, Fallrohre u. a.,
- Gesimsverkleidungen.

An der Atmosphäre, wo Kupfer in der Regel ohne Oberflächenbeschichtung verwendet wird, zeichnet es sich durch eine hohe Korrosionsbeständigkeit aus, die auf die Ausbildung einer rotbraunen bis lindgrünen Oxidschicht, der sogenannten Patina, zurückzuführen ist. Diese Schutzschicht bildet sich an der Atmosphäre auf der Oberfläche von Bauteilen aus Kupfer und ist witterungsbeständig, festhaftend und ungiftig. Sie ist in der Lage, sich bei mechanischer Beschädigung der Oberfläche zu regenerieren. Korrosionsprobleme treten bei Kupfer nur dann auf, wenn die gleichmäßige Ausbildung dieser Deckschicht gestört wird.

Die hohe Witterungsbeständigkeit von Bauteilen aus Kupfer hat dazu geführt, daß ihre Lebensdauer bei fachgerechter Planung und Ausführung und ausreichender Blechdicke mit der üblichen Standzeit des Gebäudes gleichzusetzen ist. Kupferlegierungen weisen ein ähnliches Korrosionsverhalten wie reines Kupfer auf.

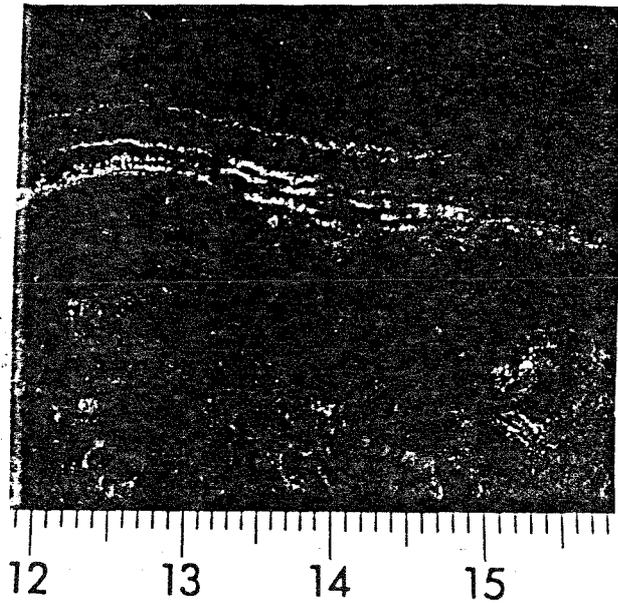


Abb. 4.12: Lochfraß an einer Kupferabdeckung

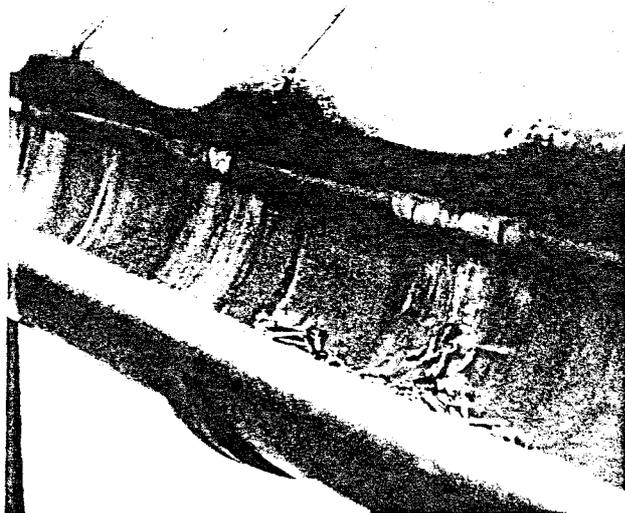


Abb. 4.13: Ablaufspuren unterhalb der Sicken der Dacheindeckung in einer Kupferdachrinne

4.4.1 Erscheinungsbilder

Luftverunreinigungen, in erster Linie saure Atmosphärenteilchen, beeinflussen das Korrosionsverhalten von Bauteilen aus Kupfer und verstärken die Verschmutzungserscheinungen an der Bauteiloberfläche. Sie nehmen Einfluß auf die chemische Zusammensetzung der schützenden Oxidschichten und auf deren Bildungsgeschwindigkeit. Bei stärkerer Beanspruchung durch konzentrierte Säuren kann die Bildung der Oxidschicht ausbleiben.

Der Einfluß von Luftverunreinigungen auf Kupferbauteile läßt sich folgendermaßen beschreiben:

Die verschiedenen Verunreinigungsbestandteile der Atmosphäre bestimmen den Farbton der Schutzschicht. Eisenrostanteile in der Atmosphäre geben der Schutzschicht eine lindgrüne Färbung, während Rußanteile die Schutzschicht trüben und verdunkeln. Bei besonderer Belastung führen die Einwirkungen zu einer deutlichen Beeinträchtigung des Gesamterscheinungsbildes.

Korrosionserscheinungen können durch starken Einfluß von Industrieabgasen hervorgerufen werden. Die Oberfläche von Kupferbauteilen weisen neben einer grünlichen Gesamtfärbung unregelmäßige schwarze und scheckig ausgebildete Verfärbungen auf. Diese schwarze Schicht springt wie Rost ab, so daß das darunterliegende Metall wieder sichtbar wird.

Bei Dacheindeckungen ist unterhalb der Tropfstellen von Einlaufmulden an Dachentwässerungssystemen das Ausbleiben der Bildung einer schützenden Patina zu beobachten. Ebenso sind bei unzureichender Gefällegebung und Eindeckung schädigende Korrosionserscheinungen beobachtet worden.

4.4.2 Die Schadstoffe und ihre Wirkungsmechanismen

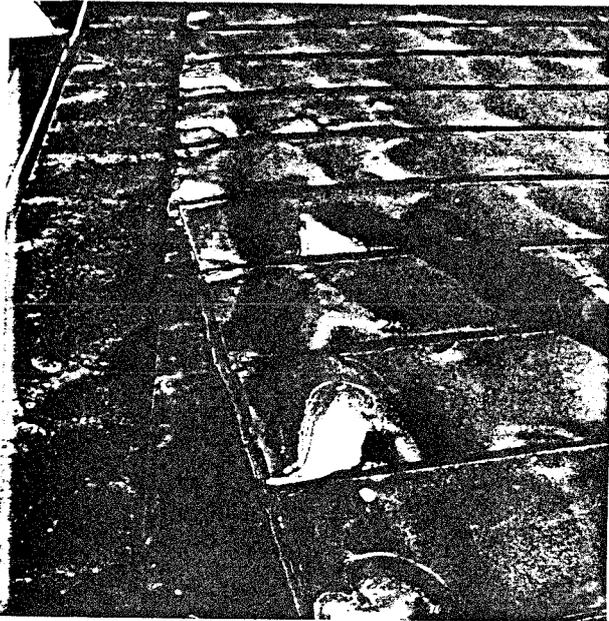


Abb. 4.14: Verstärkte Korrosion im Bereich von Pfützenbildungen

Auf die schädigenden Auswirkungen von Luftverunreinigungen auf Bauteile aus Kupfer weist besonders der Einfluß der makroklimatischen Atmosphärentypen auf die Ausbildung der schützenden Patina hin. Verantwortlich sind hierfür in erster Linie die sauren Atmosphärien, besonders Schwefeldioxid (SO_2), die bei starker Konzentration, z. B. bei der Lösung saurer, partikelförmiger Luftverunreinigungen durch Tau oder Nebel, zu Schäden führen können.

Andere Chemikalien wie Schwefelwasserstoff führen, in Einzelfällen, zu spezifische Schäden an Kupferbauteilen und sind unter Umständen auf lokale Emittenten zurückzuführen.

Saure Atmosphärien

Die Bildung einer schützenden Patina wird von der Feuchtigkeitsbelastung, der Temperatur und der Exposition des Bauteils im wesentlichen durch saure Atmosphärien beeinflusst. Von den Inhaltsstoffen der Atmosphäre direkt abhängig ist

- die Bildungsgeschwindigkeit und
- die chemische Zusammensetzung

der Schutzschicht.

Die unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen führen zu folgenden Bildungszeiten der Patina:

Meeresatmosphäre	4 - 6	Jahre
Industrieatmosphäre	5 - 8	Jahre
Stadtatmosphäre	8 - 12	Jahre
Landatmosphäre	20 - 30	Jahre

Die beschleunigte Ausbildung der Schutzschicht wird auf das durch Schwefeldioxid, Kohlendioxid und nitrosen Gasen schwach saure Regenwasser zurückgeführt. Erst konzentrierte Säuren sind in der Lage, die Ausbildung der Patina zu verhindern.

Durch den Einfluß regional unterschiedlicher Inhaltsstoffe der Atmosphäre ändert sich auch die chemische Zusammensetzung der Schutzschicht. Sie besteht in der Meeresatmosphäre aus basischem Kupferchlorid, in der Industrieatmosphäre aus basischem Kupfersulfat und in der Landatmosphäre aus basischem Kupfercarbonat. Die chemische Zusammensetzung dieser Schutzschichten bestimmt ihren Farbton, sie ist stabil und besitzt daher

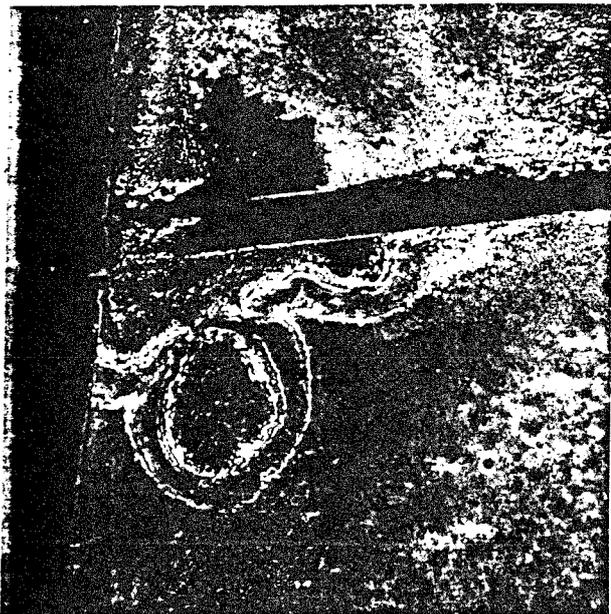


Abb. 4.15: Detail aus 4.14

eine hohe Beständigkeit gegenüber den Schwefelverbindungen in der Industrielatmosphäre. Erst stärkere Konzentrationen wie sie an Schornsteinabdeckungen schlecht regulierter Feuerungsanlagen auftreten können, führen zu Korrosionsschäden, die bis zur Zerstörung der Kupferbauteile führen können.

Ähnlich verhält sich die Einwirkung saurer Atmosphärenteilchen an den Tropfstellen von Einlaufstellen der Dacheindeckungen. Staub und Rußablagerungen mit sauren Inhaltsstoffen haften besonders gut auf der rauhen Oberfläche der Dacheindeckungen und treffen nach der Lösung durch geringe Feuchtigkeitsmengen (Taufwasser, Nebel) stark konzentriert auf das Traufblech und die Regenrinne. Der immer auf die gleiche Stelle erfolgende Angriff führt zum Ausbleiben der Schutzschichtbildung und bei stärkerer Belastung zu Korrosionserscheinungen an den Einlaufstellen.

Als ausschlaggebende Komponente für Korrosionsschäden an Kupferbauteilen wird von den sauren Atmosphärenteilchen in der Literatur hauptsächlich Schwefeldioxid beschrieben. Betrachtet man dagegen das chemische Verhalten von Kupfer, so ist festzustellen, daß es sich nur dann in Säuren löst, wenn diese oxidierend wirken oder stabile Komplexverbindungen zu bilden vermögen. Verdünnte Salpetersäure, wie sie an der Atmosphäre aus Stickstoffoxiden entsteht, besitzt diese oxidierende Wirkung und ist in der Lage, Kupfer leicht zu lösen. Wie und in welchem Umfang dieser chemische Prozeß für das schädigende Einwirken von Luftverunreinigungen auf Bauteile aus Kupfer mit verantwortlich ist, bleibt zur Zeit noch unbeantwortet.

Partikelförmige Luftverunreinigungen

Partikelförmige Luftverunreinigungen in Form von Staub und Ruß bewirken ein Verschmutzen der ihnen ausgesetzten Bauteiloberflächen. Dies trifft auch auf Oberflächen von Kupferbauteilen zu. Die Verschmutzungen der Bauteiloberfläche, die oft besonders deutlich an der regen- und windabgewandten Seite zu beobachten sind, führen mit den Jahren zu einem unregelmäßigen Verschmutzungsgrad und können das Erscheinungsbild eines Gebäudes beeinträchtigen.

Für die ungleichmäßigen Schmutzablagerungen an Konstruktionselementen und Fassadenoberflächen können folgende Gründe aufgeführt werden:

-
- Belastung durch den makroklimatischen Atmosphärentyp
 - Mikroklimatische Belastung (Lage zu lokalen Emittenten)
 - Exposition des Bauteils:
Dem Regen ausgesetzte Teile sind geringer verschmutzt als die geschützten.
 - Ablaufendes Regenwasser:
An Fassaden ablaufendes Regenwasser kann entweder reinigen oder dunkle Schmutzfahnen ausbilden.

Eine schädigende Wirkung auf die Bausubstanz kann vom Staub ausgehen, wenn die Ablagerungen gasförmige Luftverunreinigungen adsorbieren. Die Staubablagerung kann dann je nach Schadstoffgehalt und Feuchtigkeitsangebot als Katalysator bei der Bildung von Säuren oder als ätzende Kompresse auf der Bauteiloberfläche zerstörend wirken. Das Ausmaß dieser Schädigungsmöglichkeit auf Bauteile aus Kupfer ist bisher nicht abgeschätzt worden.

4.4.3 Nachbesserung

Aufgrund der guten Witterungsbeständigkeit von Bauteilen aus Kupfer und Kupferlegierungen müssen bei fachgerechter Anwendung nur in Ausnahmefällen Nachbesserungsarbeiten aufgrund von Witterungseinflüssen und aggressiven Umweltbelastungen durchgeführt werden. Die sich je nach Schadstoffgehalt der Atmosphäre in ihrer chemischen Zusammensetzung unterschiedlich ausbildenden Schutzschichten geben nach bisherigen Kenntnissen keinen Hinweis auf mögliche auftretende Schäden, die frühzeitige Nachbesserungsarbeiten notwendig machen würden.

Die Oberfläche von Kupferbauteilen bleibt in der Regel unbeschichtet. In besonders exponierten Lagen, z. B. bei hohen Schwefeldioxidimmissionen an Kaminabdeckungen, kann eine Beschichtung mit Blei oder Bitumen sinnvoll sein. Ist die Korrosion bereits so weit fortgeschritten, daß größere Bereiche der Oberfläche zerstört sind, so sind die beschädigten Teile auszubessern oder auszutauschen.

Besondere Bedeutung kommt jedoch dem vorbeugenden Schutz der Bauteile durch konstruktive Maßnahmen zu. Zu diesen Maßnahmen zählen:

- Die Ausbildung von Tropfkanten, um ein einwandfreies Abtropfen des Regenwassers zu gewährleisten.
- Die Ausbildung eines Gefälles an Abdeckungen, Randeinfassungen und Regenrinnen, um stehendes Regenwasser zu vermeiden, und um Schmutzablagerungen abzuführen.
- Unter Umständen der vorbeugende Auftrag und die periodische Erneuerung einer Beschichtung.

4.4.4 Zusammenfassung

Bauteile aus Kupfer und Kupferlegierungen besitzen bei baustoffgerechter Planung und Anwendung eine besonders gute Witterungsbeständigkeit. Das liegt an der Ausbildung einer schützenden Patina, deren chemische Zusammensetzung von den Bestandteilen der Atmosphäre abhängig ist. Die Schutzschicht gilt auch in hoch belasteten Gebieten (Industrieatmosphäre) als festhaftend und witterungsbeständig.

Die gute Position des Kupfers in der elektrolytischen Spannungsreihe ist ein Indiz für die Säurebeständigkeit von Kupfer, so daß sich saure Atmosphären in der Regel nicht schädigend auf Bauteile aus Kupfer auswirken. Eine Ausnahme bilden konzentrierte Säuren (z. B. Schwefelsäure, Salpetersäure), die in der Lage sind, die Ausbildung einer Schutzschicht zu verhindern. Betroffen sind hiervon besonders Bereiche stärkerer Schmutzablagerungen (z. B. unterhalb der Einlaufstellen von Dacheindeckungen), wo in Verbindung mit geringen Feuchtigkeitsmengen stärker konzentrierte Säuren auftreten können.

Es können Korrosionsschäden entstehen, die die hohe Lebensdauer von Kupferbauteilen reduzieren und Nachbesserungsarbeiten nötig machen, die im Einzelfall bis zur vollständigen Erneuerung führen können.

4.5 Blei

Blei zählt neben dem Kupfer zu den ältesten im Bauwesen verwendeten Metallen. Es zeichnet sich durch seine hohe Lebensdauer und seine plastischen Verarbeitungsmöglichkeiten aus. Der Witterung ausgesetzt, findet Bleiblech (Walzblei) Verwendung für

- Fassadenbekleidungen,
- Dachdeckungen,
- Klempnerarbeiten an Dachrandanschlüssen, Dachdurchdringungen, Abdeckungen, Anschlüsse und Verwahrungen.

An der Atmosphäre, wo Blei in der Regel ohne Oberflächenbeschichtung verwendet wird, zeichnet es sich durch eine hohe Korrosionsbeständigkeit aus. Sie beruht auf der Ausbildung einer blaugrauen Oxidschicht, der sogenannten Patina. Diese Schutzschicht besteht aus basischem Bleikarbonat, ist an der Atmosphäre beständig und schützt die Bleioberfläche vor weiterer Oxidation. Bei mechanischer Beschädigung der Oberfläche ist die Schutzschicht in der Lage, sich zu regenerieren.

Die hohe Witterungsbeständigkeit von Bauteilen aus Blei hat dazu geführt, daß ihre Lebensdauer bei fachgerechter Planung und Ausführung keine Einschränkung erfährt und sie mit der üblichen Standzeit des Gebäudes gleichzusetzen ist.

Luftverunreinigungen in Form saurer Atmosphäriken, Staub und Ruß scheinen nach bisherigen Erkenntnissen die Korrosion von Bauteilen aus Blei an der Atmosphäre nicht so zu beschleunigen, daß Schadensfälle bekannt geworden sind. Godard (105) beschreibt, daß Blei oft für das korrosionswiderstandsfähigste Baumetall gehalten wird, und vom Schwefeldioxid (SO_2) der Industrielatmosphäre nicht angegriffen wird. Diese Aussage deckt sich mit der allgemein bekannten Säurebeständigkeit von Blei. Ähnlich äußert sich auch Karsten (52), der Blei insbesondere in Industrielatmosphäre eine gute Beständigkeit zuschreibt, die auf der Ausbildung einer unlöslichen, grauschwarzen Schutzschicht aus Bleisulfat (PbSO_4) beruht.

Regenwasser wirkt an der Oberfläche von Bauteilen aus Blei dann korrosionsfördernd, wenn die Schutzschicht noch nicht ausgebildet ist. Die schnellere Ausbildung der Schutzschicht führt in SO_2 -haltiger

Atmosphäre dazu, daß die Korrosion in verunreinigter Atmosphäre sogar geringer als in der Landatmosphäre (Karsten, 52) sein kann.

Knöfel (55) weist dagegen auf die Abtragungsraten von Blei in Abhängigkeit des makroklimatischen Atmosphärentyps hin, die von der Industrieatmosphäre über die Meeresatmosphäre, Stadtatmosphäre zur Landatmosphäre abnehmen. Diese Aussage weist qualitativ auf eine beschleunigte Korrosion beim Einfluß von Luftverunreinigungen auf Bauteile aus Blei hin, die in der Fachliteratur jedoch bisher nicht weiter ausgeführt worden ist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß Blei durch Luftverunreinigung weitgehend nicht beeinträchtigt wird.

5. Schäden durch Luftverunreinigungen an organischen Baustoffen

Die organischen Baustoffe Bitumen, Holz und Kunststoff bestehen ausschließlich aus organischen Verbindungen, die durch Atombindungen gebildet werden. Diese Verbindungen bestimmen zwei Eigenschaften, die nach Knoblauch (54) allen organischen Baustoffen vorgegeben sind:

- sie besitzen eine gute Beständigkeit gegenüber anorganischen Säuren, Basen und Salzen, und
- sie besitzen eine hohe Empfindlichkeit gegenüber höheren Temperaturen und UV-Strahlung.

Bezüglich der Luftverunreinigungen deutet die gute Beständigkeit gegenüber anorganischen Säuren, Basen und Salzen darauf hin, daß organische Baustoffe eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber den Schadstoffen der Luft besitzen. Die geringe Anzahl der aus der Baupraxis bekanntgewordenen Schadensfälle stützt diese Überlegung.

Hieraus den Schluß zu ziehen, organische Baustoffe seien auch unter aggressiven Umweltbedingungen ausreichend resistent, erweist sich jedoch als falsch. Zwar verliert Schwefeldioxid (SO_2) sonst Hauptverursacher von Schäden an anorganischen und metallischen Baustoffen, die führende Rolle hinsichtlich der schädigenden Einwirkung der Aerosphäriden bei den organischen Baustoffen, aber die organischen Baustoffe, besonders Kunststoffe können durch gasförmige und flüssige Luftverunreinigungen physikalische und chemische Veränderungen erfahren, die zu ungünstigen Eigenschaftsänderungen führen.

Die geringe Anzahl der bisher an der verunreinigten Atmosphäre aufgetretenen witterungs- bzw. alterungsbedingten Schadensfälle, macht es bei den organischen Baustoffen notwendig, die Erkenntnisse über den schädigenden Einfluß von Luftverunreinigungen in gekürzter Form zusammenzutragen.

5.1 Holz

Schäden an Außenbauteilen aus Holz, bei denen Luftverunreinigungen als Verursacher bzw. Mitverursacher aufgetreten sind, sind bisher nicht bekannt geworden. Das liegt an der guten Witterungsbeständigkeit mit der sich Holz bei materialgerechter Anwendung als Außenbauteil auszeichnet. Eine von Wegner (183) durchgeführte labormäßige Untersuchung über das Verhalten von Holz in aggressiver Atmosphäre, weist ebenfalls auf eine gute Beständigkeit hin. Bei der Untersuchung zeigte Chlor eine stärkere Wirkung als Schwefeldioxid (SO_2). Ammoniak und Formaldehyd haben dagegen keine negativen Auswirkungen auf die Festigkeit des Holzes gezeigt.

An der Atmosphäre verwittert die Oberfläche von unbehandeltem Holz durch die Einflüsse von Licht, Feuchtigkeit und Sauerstoff. Die Verwitterung zeigt sich in einem Vergrauen sowie in einer reliefförmigen Ausbildung (Erosion) der Oberfläche. In Abhängigkeit von der Exposition des Bauteils (z. B. Himmelsrichtung, Neigung der Fläche u. a.) werden die Witterungseinflüsse mehr oder weniger deutlich sichtbar.

Gegen chemische Einflüsse ist Holz relativ beständig. Dies gilt für angreifende Medien, deren pH-Wert im Bereich zwischen pH 2 und pH 10 liegt. Unterschiedliche

- Holzarten,
- Einwirkungszeiten und
- Einwirkungstemperaturen der Medien

können jedoch geringfügige Abweichungen möglich machen. Die Widerstandsfähigkeit von Holz gegenüber angreifende Medien im Bereich von pH 2 bis pH 10 weist auf eine gute Säurebeständigkeit hin, Laugen dagegen (pH-Wert 10) können zerstörend wirken.

Die durch Luftverunreinigungen hervorgerufenen Schäden an Baustoffen werden nach bisherigen Erkenntnissen in erster Linie von sauren Atmosphärrillen verursacht. Diesbezüglich sind bisher bei Holz keine Schadensfälle bekannt geworden. Es ist anzunehmen, daß Holz aufgrund seiner chemischen Widerstandsfähigkeit gegenüber Schadstoffen aus der Atmosphäre sehr resistent ist.

Im Außenbereich wird Holz in der Regel vor den Witterungseinflüssen geschützt. Dies kann durch

- einen konstruktiven Schutz,
- einen chemischen Schutz,
- einen Oberflächenschutz oder
- einer Kombination aus ihnen

geschehen. Sie tragen dazu bei, den Verwitterungsprozeß zu verzögern.

Besonders den Oberflächenbehandlungen kommt als Schutzmaßnahme gegen Witterungseinflüsse große Bedeutung zu. Sie werden in Form von Lacken oder Lasuren auf die Holzoberfläche aufgetragen und sind der Witterung direkt ausgesetzt. Die Beständigkeit der Oberflächenbeschichtung bestimmt das Langzeitverhalten der zu schützenden Holzbauteile. Sie müssen in regelmäßigen Wartungsintervallen überprüft und ggf. erneuert werden. Als Standzeit für die unterschiedlichen Anstrichsysteme werden von Böttcher (93) bei mittlerer Belastung folgende Werte angegeben:

Klarlacke	außen nicht empfehlenswert
Imprägnierlasuren	1 bis 2 Jahre
Dickschichtlasuren	2 bis 3 Jahre
Dispersionslackfarben	3 bis 4 Jahre
Alkydharz-Decklacke	3 bis 6 Jahre

Abb. 6.1: Standzeit von Oberflächenbeschichtungen auf Holz bei mittlerer Belastung (nach Böttcher (93)).

Luftverunreinigungen tragen dazu bei, die Belastungen der Atmosphäre zu erhöhen, so daß in stärker belasteten Gebieten die Beschichtungen größeren Schichtdickenverlusten unterworfen sind (vgl. Kap. 3.3 und 4.1). Es ist davon auszugehen, daß der Wirkungsmechanismus des Schichtdickenabtrages von Beschichtungen auf Holzbauteile durch Luftverunreinigungen, zumindest bei den deckenden Beschichtungen, dem Schichtdickenverlust auf anderen Untergründen entspricht.

Ozon (O_3) führt auch bei den Lacken auf Holz- und Holzwerkstoffuntergründen zu einer Versprödung der Oberflächenschicht, besonders dann, wenn das Material gleichzeitig einer mechanischen oder thermischen Belastung unterworfen ist (Groß, 40). Inwieweit dies auch für die Lasuren zutrifft, ist in der Literatur bisher nicht beschrieben worden. Nachteilig kann sich eine Oberflächenbehandlung mit Lasuren dann erweisen, wenn sich feinste Ablagerungen partikelförmiger

Luftverunreinigungen in Form von Staub oder Ruß in den Poren des Holzes festsetzen und nur schwer wieder zu entfernen sind.

5.2 Bituminöse Baustoffe

Die bituminösen Baustoffe werden im Hochbau als Bindemittel und als Abdichtungsstoff verwendet.

Die chemische Verknüpfung der Kohlenwasserstoffmoleküle verleihen den im Bauwesen verwendeten bituminösen Stoffen thermoplastische Eigenschaften. Sie besitzen keinen definierten Schmelzpunkt, sondern erweichen bei Erwärmung und verfestigen sich zunehmend bei Temperaturabfall.

Bituminöse Baustoffe sind chemisch recht reaktionsträge und deshalb gegenüber Säuren, Laugen und Salzlösungen sowie in der Witterung beständig. Aufgrund dieser chemischen Beständigkeit finden sie auch als Korrosions- und Bautenschutzanstriche auf vielen metallischen und mineralischen Untergülden Verwendung.

Während Bitumen an der Atmosphäre nur leicht oxidiert, wird Teer unter Umweltbedingungen zunehmend härter und spröder. Dieser als Alterung bezeichnete Vorgang wird vermutlich durch die Oxidation ungesättigter Kohlenwasserstoffe zu Molekülen mit Harzcharakter verursacht (Knöfel, 55). Dies ist ein Grund dafür, daß Teerwerkstoffe heute praktisch kaum noch verwendet werden.

Luftverunreinigungen in Form saurer Atmosphärrillen oder Staubablagerungen sind nach bisherigen Erkenntnissen nicht als Verursacher von Schäden an bituminösen Baustoffen aufgetreten. Auch über eine mögliche beschleunigende Beteiligung von Luftverunreinigungen beim Verwitterungsprozeß liegen in der Fachliteratur bisher keine Erkenntnisse vor.

Eine Sonderstellung nimmt die unter dem Stichwort der Bitumenkorrosion bekannt gewordene Entstehung wasserlöslicher, saurer Abbauprodukte des Bitumens ein, bei der nach dem augenblicklichen Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse nicht von einer Beteiligung luftverunreinigender Stoffe ausgegangen wird. Diese sauren Abbauprodukte entstehen bei der Verwitterung und werden in erster Linie auf den Einfluß der UV-Strahlung zurückgeführt. Bei der Anwesenheit von geringen Feuchtigkeitsmengen (Tauwasser, Nebel) bilden sich Säuren hoher Konzentration, die Metalle korrosiv angreifen. Abstrahlungsschichten haben u. a. die Aufgabe, diesen schädigenden Einfluß der UV-Strahlung zu unterbinden.

5.3 Kunststoffe

Kunststoffe haben in den letzten Jahren auch im Außenbereich des Bauwesens zunehmend Verwendung gefunden. Die Vielzahl der verwendeten organischen Kunststoffe sind in der Regel Produkte der Kohlenstoffchemie, deren unterschiedlicher Molekülaufbau erhebliche Eigenschaftsunterschiede bedingt und es nötig macht, das Verhalten der Kunststoffe an der Atmosphäre nach Kunststoffgruppe, Verarbeitung, Herstellung, Anwendung und Belastung stark zu differenzieren.

Hinsichtlich ihrer Witterungsbeständigkeit haben sich die Kunststoffe bisher als sehr günstig erwiesen. Zur Zeit mangelt es aber noch an Langzeitversuchen und Langzeiterfahrungen, die die vorhandenen Kenntnisse über die verschiedenen Abbaureaktionen der Kunststoffe an der Atmosphäre bei gleichzeitiger und wechselnder Beanspruchung durch die unterschiedlichen Witterungseinflüsse vertiefen.

So geht man heute davon aus, daß bei fachgerechter Planung und Anwendung die Alterung die Gebrauchsdauer der Kunststoffe an der Atmosphäre bestimmt. Unter Alterung wird die Gesamtheit der bleibenden physikalischen und chemischen Veränderungen, die durch Umweltbedingungen (Licht, Luft, Staub, gasförmige und flüssige Luftverunreinigungen, Temperatureinflüsse, Zug, Druck u. a.) verursacht werden (Knöfel, 55), verstanden.

Die Korrosion der Kunststoffe durch

- flüssige Medien (Lösungsmittel),
- Oxidation (Sauerstoff, oxidierende Säuren, Verbrennungen) oder
- Spannungseinfluß

wird oft mit unter diesen Begriff der Alterung zusammengefaßt.

Die Alterung bewirkt nachteilige Eigenschaftsveränderungen, die sich je nach der chemischen Zusammensetzung der Kunststoffe und der Belastung in der

- Minderung der chemischen Beständigkeit,
- Farbveränderungen,
- Mattwerden,
- Versprödung u. a.

zeigen können.

Die Aussagen über den Alterungsprozeß werden durch Beobachten und Untersuchungen der letzten 20 Jahre an verbauten Kunststoffen gestützt und beziehen sich allgemein auf das Verhalten an der Atmosphäre, bei der mit einer durchschnittlichen Belastung durch Luftverunreinigungen zu rechnen ist. Über das schädigende Einwirken der Schadstoffe selbst liegen zur Zeit in der Fachliteratur nur sehr vereinzelte Stellungnahmen vor.

So weisen Jörg u. a. (123) darauf hin, daß Polymere einem Alterungsprozeß unterliegen, der durch den Einfluß von klimatischen Faktoren, Schadstoffen der Luft sowie deren Wechselwirkung beschleunigt werden kann. Die Autoren weisen darauf hin, daß sich die durch den Alterungsprozeß bedingten nachteiligen Eigenschaftsänderungen in der Minderung der chemischen Beständigkeit, der Festigkeit, der Elastizität der Oberflächenbeschaffenheit (z. B. Verspröden), in Farbveränderungen u. ä. zeigen können, so daß dadurch die Lebensdauer der Bauteile aus Kunststoff eingeschränkt wird.

Die Aussagen stützen sich auf die eigenen Forschungsberichte, die den Einfluß gasförmiger Schadstoffe aus der Umwelt auf Polymere (48, 51) beschreiben. Hier wurde der Einfluß verschiedener Stickoxidkonzentrationen unter definierten Umweltbedingungen an polymeren Probematerialien (Planen, Folien, Textilien) labormäßig untersucht und die Materialveränderungen mit Hilfe optischer und mechanischer Prüfverfahren erfaßt. Es hat sich gezeigt, daß die kombinierte Beanspruchung von Stickstoffdioxid (NO_2) und Sonnenlicht Schäden hervorruft, die sich qualitativ und quantitativ von denjenigen unterscheiden, die beim Einwirken der Einzelfaktoren auftreten. Es wurden vorwiegend die Farbstabilität und das mechanische Verhalten der Probematerialien negativ beeinflusst.

Diese Ergebnisse zeigen, daß Luftverunreinigungen in Form von Stickoxiden beschleunigenden Einfluß auf die Alterung von Kunststoffen nehmen und damit zu negativen Eigenschaftsveränderungen beitragen. Das Ausmaß dieser schädigenden Einwirkung für die Praxis kann nach den bisherigen Erkenntnissen bei gleichzeitiger Einwirkung sämtlicher, tatsächlicher vorhandener Umweltbedingungen nicht abgeschätzt werden.

Neben dem schädigenden Einwirken von Stickoxiden ist bekannt, daß Ozon (O_3) Schäden an Polymeren, besonders bei den Polymeren mit Doppelbindungen (77), hervorrufen kann. Ozon ist in der Lage, Elastomere mit Doppelbindungen in mechanisch be-

lastetem Zustand anzugreifen. Über die Bindungs-
sprengung führt der Angriff von Ozon zu negati-
ven Eigenschaftsveränderungen, wie Versprödung
und/oder Ausbleichung der Materialoberfläche.

Der Mangel an Langzeiterfahrungen auf dem Gebiet
der Witterungsbeständigkeit von Kunststoffen
macht es zur Zeit noch notwendig, das Verhalten
von Kunststoffen an verunreinigter Atmosphäre
mit Hilfe ihrer chemischen Widerstandsfähigkeit
einzuschätzen. Richtwerte über die chemische Be-
ständigkeit (vgl. Tab. 5.2) wichtiger Kunststoffe
geben hier eine Orientierung:

		Säuren			Laugen		Wasserauf- nahme nach DIN 53 472 mg
		schwach	stark	oxidierend	schwach	stark	
Polyvinylchlorid (PVC)	hart	1	1	2	1	1	3...20
	weich	1	2	3	1	3	≈ 20
Polyäthylen (PE)	hart	1	1	5	1	1	≈ 0
	weich	1	1	5	1	1	≈ 0
Polypropylen (PP)		1	1	5	1	1	≈ 0
Polyisobutylen (PIB)		1	1	3	1	1	≈ 0
Polystyrol (PS)		1	2	3	1	1	≈ 0
Polymethylmethacrylat (PMMA)		1	1	3	1	1	45
Phenolharze (Phenoplaste, PF)		1	5		1	5	< 20
Aminoplaste (Melaminharz, MF; Harnstoffharz, UF)		3	5		1	5	200...400
Polyesterharze (UP)		1	3	4	3	4	≈ 20
Polyamide (PA)		5	5	5	1	3	100...1000
Polyurethane (PUR)		1	4	5	3	3	< 100
Polytetrafluoräthylen (PTFE)		1	1	1	1	1	≈ 0
Epoxidharze (EP)		1	1	5	2	2	< 10
Polycarbonat (PC)		1	1	3	5	5	≈ 10

Zeichenerklärung: 1 beständig, 2 i. a. ausreichend beständig,
3 bedingt beständig, 4 meist unbeständig,
5 völlig unbeständig

Abb. 5.2: Richtwerte der Beständigkeit gegenüber
Säuren und Laugen sowie die Wasserauf-
nahme wichtiger Kunststoffe.

Es hat sich gezeigt, daß die meisten der im Außenbereich verwendeten Kunststoffe gegenüber Säuren und Laugen beständig sind. Für das Witterungsverhalten von Kunststoffen in verunreinigter Atmosphäre läßt sich hieraus ableiten, daß sie gegenüber den sauren Atmosphäriolen, die nach den bisherigen Erkenntnissen die wesentliche Ursache für die Schäden an anorganischen und metallischen Baustoffen darstellen, beständig sind. Hierauf weist auch die Verwendung organischer Beschichtungen als Korrosions- und Witterungsschutz hin.

Der Schwefeldioxidgehalt scheidet jedoch nicht als Faktor bei der schädigenden Einwirkung auf Polymere aus, da er z. B. eine zerstörende Wirkung auf Anstriche und ähnliche Beschichtungen hat. Groß (40) weist darauf hin, daß SO_2 unmittelbar die Beschichtung in dem besonders kritischen Zustand der Filmbildungsphase und beim Trocknungs-/Härtungsvorgang beeinflusst und weiterhin mit Bindemitteln, Pigmenten und Füllstoffen chemische Reaktionen eingeht. Auch hier sind die Wirkungsmechanismen und das Ausmaß der Schäden in der Fachliteratur noch nicht weiter beschrieben worden.

Partikelförmige Luftverunreinigungen in Form von Staub und Ruß bewirken auch ein Verschmutzen der Außenbauteile aus Kunststoff. Sie führen bei den der verunreinigten Atmosphäre ausgesetzten organischen Bauteilen und Baustoffen wie Fassadenplatten, Kunstharzputzen, Beschichtungen, Fensterprofilen u. a. zu einem unregelmäßigen Verschmutzungsgrad, der zu einem optisch beeinträchtigten Erscheinungsbild führt. Die in Regenwasser gelösten Schmutzpartikel hinterlassen deutlich erkennbare Fließbahnen, die an konstruktiv ungünstig ausgebildeten Punkten verstärkt auftreten.

Für die unregelmäßige Verschmutzung an Außenbauteilen aus Kunststoffen können folgende Gründe aufgeführt werden:

- Unterschiedliche Regenexposition:
Dem Regen ausgesetzte Teile sind geringer verschmutzt als die geschützten.
- Ablaufendes Regenwasser:
An Fassaden oder Mauern ablaufendes Regenwasser kann entweder reinigen oder dunkle Schmutzfahnen ausbilden.
- Ungleichmäßige Oberflächengestaltung:

Eine unregelmäßig ausgebildete Oberfläche führt zu einer unregelmäßigen Ablagerung partikelförmiger Luftverunreinigungen.

- Unterschiedliche mikroklimatische Bedingungen: Lokal unterschiedliche Emission- und Immissionsbedingungen führen zu unterschiedlichen Verschmutzungsgraden der ihnen ausgesetzten Bauteile.

Die Verunreinigungen der Atmosphäre machen zur Erhaltung des Erscheinungsbildes bei den Bauteilen aus Kunststoff einen erhöhten Wartungsaufwand in Form von Reinigungsarbeiten notwendig, wobei sich der Umfang der Arbeiten an den örtlichen Belastungen orientiert. Schäden in Form negativer Eigenschaftsänderungen der im Hochbau verwendeten Kunststoffe sind durch partikelförmige Luftverunreinigungen in der Fachliteratur bisher nicht beschrieben worden.

Der Mangel an Untersuchungen über das Verhalten von Kunststoffen an der Atmosphäre, besonders ein fehlender Vergleich über die Lebenserwartung in unterschiedlichen Atmosphärentypen, wie er z. B. für die Metalle vorliegt, machen es zur Zeit noch nicht möglich, den schädigenden Einfluß luftverunreinigender Schadstoffe auf die Eigenschaften und die Lebenserwartung der im Bauwesen verwendeten Kunststoffe genau zu beschreiben.

Abschließend sollen die Lebenserwartungen der wichtigsten im Bauwesen verwendeten Kunststoffe dargestellt werden, soweit sie bisher angegeben werden können. Die Angaben beziehen sich im wesentlichen auf die Erfahrungen über das Langzeitverhalten von Kunststoffen, wie sie in den letzten 30 Jahren an unterschiedlich verunreinigter Atmosphäre gesammelt werden konnten.

Fassadenplatten und Fensterprofile

Für die Herstellung von Fassadenplatten und Fensterprofile aus Kunststoff werden in der Regel PVC-hart, PMMA oder melaminharzgebundene Werkstoffe verwendet. Ihr Langzeitverhalten wurde über längere Zeiträume in der Praxis beobachtet, so daß die Lebensdauer heute mit mehr als 20 Jahren angegeben werden kann.

Kunstharzputze

Die Entwicklung der Kunstharzputze ist in den letzten Jahren deutlich fortgeschritten, kann aber immer noch nicht als abgeschlossen betrachtet werden. Zur Erhaltung ihrer Funktionsfähigkeit sind im wesentlichen die wasserabweisenden Eigenschaften des Harzes als Bindemittel entscheidend. Neuere Entwicklungen von nicht quellenden, wasserabweisenden Kunstharzputzen sowie deren Aufnahme in die DIN 18 550 (6) bzw. DIN 18 558 (7) deuten darauf hin, daß von ihnen eine ähnlich lange Lebensdauer zu erwarten ist, wie sie für die mineralischen Putze gilt.

Organische Beschichtungen

Bei der Vielzahl der auf dem Markt befindlichen organischen Beschichtungssysteme ist es nicht möglich, von einer einheitlichen Lebenserwartung der Beschichtungsstoffe auszugehen. Die Erfahrungen der Praxis zeigen, daß sie je nach ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrer Funktion, verschönernd und/oder schützend, in regelmäßigen Abständen von 5 - 15 Jahren erneuert werden müssen. Folgende Faktoren können hierbei für eine unterschiedliche Lebensdauer der Beschichtungen verantwortlich sein:

- Auswahl der Beschichtung hinsichtlich ihrer Funktion,
- Beschaffenheit des Untergrundes,
- Ausführung,
- Schichtdicke,
- Beanspruchungen durch die Umwelt u. a.

Dichtstoffe

Für die Herstellung von Dichtstoffen im Bauwesen werden in der Regel Polysulfide, Polyurethane oder Silikonkautschuke verwendet. Die Lebenserwartung der Dichtstoffe im Außenbereich, wie sie für die Abdichtung von Dehnungsfugen, Elementfugen, Anschlußfugen u. a. angewendet werden, kann nach den bisherigen Erfahrungen (Grunau, 42) mit ungefähr 15 Jahren angegeben werden. Die Erkenntnisse aus der Praxis haben jedoch gezeigt, daß

- Planungsfehler (z. B. Ausbildung der Fugen),
- Verarbeitungsfehler (z. B. mangelhafte Fachkenntnis), und
- Materialfehler (z. B. zu geringer Anteil an Bindemitteln)

zu einer hohen Schadenshäufigkeit bei der Verwendung von Dichtstoffen geführt haben, die ihre Lebensdauer erheblich reduzieren können.

Aus diesem Grund ist es erforderlich, bei der Verwendung von Dichtstoffen im Bauwesen eine außergewöhnliche Sorgfalt in Herstellung, Planung und Anwendung zu gewährleisten, um eine möglichst lange Lebensdauer zu erreichen. Zugleich ist es wesentlich, mit Dichtstoffen zu schließende Fugen so zu gestalten, daß die mit Sicherheit notwendige, turnusgemäße Erneuerung kostengünstig möglich ist. In der zurückliegenden Zeit wurde dieses häufig nicht beachtet.

6. Zusammenfassung

Der vorliegende Querschnittsbericht beschreibt den derzeitigen Kenntnisstand über die Auswirkungen von Luftverunreinigungen auf die Außenbauteile des Hochbaus.

Schadstoffe: Den folgenden, in "natürlich" zusammengesetzter Luft nicht, oder in geringerer Konzentration enthaltenen Stoffen werden schädigende Einflüsse auf die Baustoffe zugeschrieben:

- Schwefeldioxid;
- Stickstoffdioxid;
- Ozon;
- Fluorwasserstoff, Chlorwasserstoff, Schwefelwasserstoff;
- Staub- und Rußpartikel;
- Kohlendioxid, soweit dessen Konzentration deutlich über dem natürlichen Anteil in der Luft (0,029 %) liegt.

Einwirkungsart und Einwirkungsintensität: Grundsätzlich wirken die Schadstoffe in gasförmiger ("trockene Deposition"), in Feuchtigkeit gelöster ("nasse Deposition") Form sowie als partikelförmige Ablagerungen auf die Baustoffe ein. Im Einzelfall ist die Beanspruchung der Bauteiloberfläche durch Schadstoffe jedoch äußerst unterschiedlich. Das hat mehrere Gründe:

- Die Emission der Schadstoffe erfolgt räumlich und zeitlich ungleichmäßig (z. B. deutlich erhöhte Emissionen im Bereich von Industrieanlagen; deutlich höhere Konzentration im Winter);
- meteorologische Einflüsse (z. B. Windrichtung, Temperaturschichtung, Niederschlagsmengen) verteilen die emittierten Schadstoffe ungleichmäßig;
- durch die Gebäudegestaltung und Herstellungsqualität der Bauteile ist die Einwirkungsintensität der Immissionen auf die Baustoffe äußerst verschieden: So haben je nach Porosität und Rissigkeit der Bauteiloberfläche und je nach Ausführung von Schutzmaßnahmen konstruktiver (z. B. Dachüberstände, ausreichendes Gefälle horizontaler Flächen, ausreichende Betonüberdeckung von Stahlbewehrungen) und baustofftechnologischer Art (z.B. Imprägnierungen, Beschichtungen) ein und dieselben Umweltbedingungen sehr unterschiedliche Auswirkungen auf Baustoffe gleichartiger Zusammensetzung.

Schadensbilder: Die häufigsten Erscheinungsbilder der Schädigungen sind:

- Verschmutzungen,
- Ausblühungen,
- Materialabtrag (Schichtdickenverlust, Absanden, Rost),
- Abplatzungen und Rissebildungen.

Diese Schäden machen Instandhaltungsarbeiten und Instandsetzungsarbeiten erforderlich.

Ursachenabgrenzung: Da in sehr vielen Fällen gleiche oder ähnliche Schadensbilder durch

- natürliche Alterung (Verwitterung) und
- fehlerhafte Planung und Ausführung der Bauteile (Bauschäden)

entstehen können, ist es bis auf wenige Ausnahmen nicht möglich, derzeitig einen eindeutigen, zahlenmäßigen Zusammenhang zwischen dem heute notwendigen Umfang der Instandhaltungs- und Instandsetzungsarbeiten und der Veränderungen der Luftzusammensetzung herzustellen. Sicher ist jedoch, daß

- einige Schadensformen bei bestimmten Baustoffen nur durch bestimmte Schadstoffe der Luft hervorgerufen werden können,
- viele Verwitterungsvorgänge durch Luftverunreinigungen beschleunigt werden,
- die Schadensfolgen von Baumängeln durch ungünstige Umwelteinflüsse vergrößert werden.

Statistisches Zahlenmaterial mit ausreichendem Detaillierungsgrad fehlt völlig. Die bisher veröffentlichten Zahlen über die Kosten zur Beseitigung von immissionsbedingten Materialschäden in der Bundesrepublik - 3 bis 4 Milliarden DM/Jahr - müssen daher als äußerst grobe Schätzungen eingestuft werden.

Die Schädigungen an den einzelnen Baustoffen:

Der Bericht beschreibt detailliert den Kenntnisstand über das Verhalten der unterschiedlichen, an Gebäudeaußenseiten verwendeten Baustoffe und zeigt auf, daß die Beständigkeit gegenüber Luftverunreinigungen zum Teil äußerst unterschiedlich ist.

Folgende Einzelheiten seien in der Zusammenfassung hervorgehoben:

Anorganische, mineralische Baustoffe: Bei den anorganischen, mineralischen Baustoffen löst mit Schadstoffen (Schwefeldioxid, Kohlendioxid) angereicherte Feuchtigkeit die Bindemittel auf und wäscht sie aus. Besonders betroffen sind hier Natursteine mit porösem Gefüge und kalk- bzw. dolomithaltigen Bindemitteln. Bei ihnen zeigen sich die negativen Auswirkungen von Luftverunreinigungen am deutlichsten. Es entstehen Absandungen, Abplatzungen und Bröckelzerfall an der Oberfläche der Natursteinfassaden und Natursteindenkmäler, die Gebäudeteile samt ihres kulturhistorischen Wertes vernichten können. Der Aufwand an notwendigen Instandsetzungsarbeiten ist hier besonders hoch. (Siehe hierzu Forschungsbericht des BMFT, Seite 20.)

Zementgebundene Baustoffe sind ebenfalls betroffen, wenn auch aufgrund der höheren Dichtigkeit des Porengefüges in geringerem Umfang. Schwefeldioxid und Kohlendioxid führen in Verbindung mit Feuchtigkeit zu Festigkeitsverlusten bei Beton, Putz, Mörtel und Asbestzement, die die Lebensdauer dieser Baustoffe absetzen können. Eine Sonderstellung unter den teilweise auch durch Luftverunreinigungen hervorgerufenen Veränderungen nimmt die Carbonatisierung des Stahlbetons ein. Sie ist bei normalem Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre ein natürlicher Prozeß, der jedoch durch die Zunahme saurer Atmosphärien beschleunigt wird. Hier fällt es schwer, die durch Korrosion der Bewehrung in carbonatisiertem Beton hervorgerufenen, sehr erheblichen Schäden eindeutig den Luftverunreinigungen zuzuordnen, da nach der allgemeinen Erfahrung die meisten Schäden durch Planungs- und/oder Ausführungsfehler (mangelnde Betonüberdeckung der Bewehrung, unzureichende Betonqualität) verursacht worden sind, Luftschadstoffe also meist lediglich schadensverstärkend wirken.

Metalle: Bei den Metallen überlagern sich ebenfalls die durch die natürliche Verwitterung verursachten Schäden - vorwiegend die Korrosion - mit den Schäden aufgrund des Einwirkens von Luftverunreinigungen. Im Bereich der Metalle liegen vergleichsweise lange Erfahrungen über eine beschleunigende Wirkung von Schwefeldioxid in Verbindung mit hoher Luftfeuchtigkeit beim Korrosionsprozeß vor. Eisen und Stahl muß in der Regel durch organische oder anorganische Beschichtungen vor Korrosion geschützt werden. Aus diesem Grunde ist hier das schädigende Einwirken von Luftverunreinigungen im Schichtdickenverlust

des Oberzugs zu sehen. Vergleiche des Schichtdickenabtrags in Industrie- und Landatmosphäre weisen auf einen bis zu 5-fach höheren Abtrag in belasteten Gebieten hin, dementsprechend aufwendige Wartungs- und Nachbesserungsarbeiten folgen müssen.

Nichteisenmetalle werden in der Regel durch die Ausbildung einer Oxidschicht an der Atmosphäre ohne Korrosionsschutzanstrich geschützt. Luftverunreinigungen wirken dann schädigend, wenn sie als Staubablagerungen durch geringe Feuchtigkeitsmengen (Tau, Nebel) gelöst werden und dann als stark konzentrierte Lösung diese Oxidschutzschichten zerstören.

Organische Baustoffe: Von den organischen Baustoffen besitzen Holz und Bitumen bei fachgerechter Planung und Anwendung eine gute Witterungsbeständigkeit an der Atmosphäre. Bei ihnen sind bisher keine Schäden durch Luftverunreinigungen bekannt geworden. Über das Langzeitverhalten von Kunststoffen liegen im Vergleich zu den anderen Baustoffen nur wenige Erfahrungen vor. Es hat sich gezeigt, daß neben Schwefeldioxid besonders die kombinierte Beanspruchung von Stickoxiden und Sonnenlicht negative Eigenschaftsveränderungen hervorruft, die zu einer beschleunigten Alterung von Kunststoffoberflächen führen können.

Schutzmaßnahmen: Im Gegensatz zu den natürlichen Umwelteinflüssen auf Gebäude sind die Beanspruchungen aus Luftverschmutzungen durch Menschen verursacht und daher auch grundsätzlich durch Menschen verhinderbar. Überlegungen zur Beseitigung dieser primären Schadensursache sind jedoch nicht Gegenstand des vorliegenden Berichtes.

Durch geeignete Konstruktion, Materialwahl und Instandhaltung können jedoch die Schadensfolgen von Luftverschmutzungen erheblich vermindert werden. Zu diesen Maßnahmen zählen unter anderem:

- Eine Fassadengestaltung, die Schmutzablagerungen und ungleichmäßigen Wasserablauf vermeidet (z. B. möglichst keine breiten Vorsprünge, Ausbildung von Tropfkanten mit seitlichen Aufkantungen und ähnliches mehr);
- die Abdeckung horizontaler und flachgeneigter Flächen;
- eine ausreichende Gefällegebung und kontrollierte Entwässerung von Abdeckblechen, Rinnen und Dachflächen;
- die Vermeidung von Konstruktionen mit der Witterung ausgesetzten Spaltfugen und Hohlräumen;
- eine 10 mm über den Mindestanforderungen der

Stahlbetonnorm liegende Betonüberdeckung für Sichtbetonaußenbauteile und eine verschärfte Kontrolle der tatsächlich ausgeführten Überdeckung und Betonqualität im Rahmen der Bauabnahme;

- keine Verwendung von eindeutig stark schadensgefährdeten porösen Natursteinen;
- eine Gestaltung der Bauteile, die Reinigungsarbeiten, Korrosionsschutzarbeiten und absehbar notwendige Teilaustauscharbeiten auf einfache Weise möglich macht;
- ein häufigere, schonende Reinigung schadensanfälliger Bauteile;
- die Anwendung von Imprägnierungen und Beschichtungen, soweit deren langfristige Unschädlichkeit sichergestellt ist.

Offene Fragen: Gerade auf dem Gebiet der Instandhaltung und Instandsetzung von Gebäuden fehlen bisher - mit wenigen, nur begrenzt aussagefähigen Ausnahmen - langfristige Statistiken und detaillierte Untersuchungen. Diesen Mangel kann der vorliegende Querschnittsbericht nicht ausgleichen, sondern nur aufzeigen. Damit ist aber ein Anfang gemacht, gezielt und effektiv diese noch offenen Fragen durch intensive Forschungsaktivitäten einer Klärung näherzubringen.

7.1 Normen

- (1) D I N 1 0 5: Mauerziegel, November 1982
- (2) D I N 1 0 6: Kalksandsteine, September 1980
- (3) D I N 1 0 4 5: Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung, Dezember 1978
- (4) D I N 4 0 3 0: Beurteilung betonangreifender Wässer, Boden und Gase, November 1969
- (5) D I N 1 7 6 1 1: Anodischoxidiertes Halbzug aus Aluminium und Aluminium-Knetlegierungen mit Schichtdicken von mind. 10 mm, Technische Lieferbedingungen, Juni 1985
- (6) D I N 1 8 5 5 0: Putz, Januar 1985
- (7) D I N 1 8 5 5 8: Kunstharzputze, Januar 1985
- (8) D I N 5 0 9 0 0: Korrosion der Metalle, Begriffe, Teil 1, April 1982, Teil 2, Januar 1984, Teil 3, Entwurf, November 1983
- (9) D I N 5 5 9 2 8: Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungen und Überzüge, Teil 1, November 1976
- (18) K a l k s a n d s t e i n - Information GmbH & Co. KG, Hrsg.: Kalksandstein: Planung, Konstruktion, Ausführung, Betonverlag, Düsseldorf 1983
- (19) M e r k b l a t t, Instandsetzung von Betonbauteilen, Fassung März 1982, Sonderdruck aus: Beton- und Stahlbetonbau, Berlin 77 (1982), Heft 2, Seite 264 - 268
- (20) M e r k b l a t t über Schutzüberzüge auf Beton bei sehr starken Angriffen nach DIN 4030, Fassung April 1973, Sonderdruck aus: Beton, Düsseldorf 23 (1973), Heft 9, Seite 399 - 403
- (21) R h e i n z i n k, Hrsg.: Bitumenkorrosion, in: Rheinzink - Anwendung im Hochbau, 7. Auflage, Datteln, September 1984
- (22) U m w e l t b u n d e s a m t, Hrsg.: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft), Berlin, 23.02.1983
- (23) Z i n k b e r a t u n g e. V., Hrsg.: Beschichten von Zink, Titanzink, verzinktem Stahl. Technische Mitteilung Korrosionsschutz K 9, Düsseldorf

7.2 Verordnungen, Richtlinien und Merkblätter

- (10) A l u m i n i u m - Zentrale, Hrsg.: Aluminium-Taschenbuch. Aluminium-Verlag GmbH, Düsseldorf 1975
- (11) A l u m i n i u m - Zentrale, Hrsg.: Aluminiummerkblatt A5, Reinigen von Aluminium im Bauwesen, 7. Auflage, Düsseldorf
- (12) B l e i b e r a t u n g e. V., Hrsg.: Blei im Bauwesen - Handbuch für Verarbeitung von Blei, Düsseldorf 1984
- (13) B u n d e s r e g i e r u n g, Hrsg.: 13. Verordnung zur Durchführung des Bundes Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Großfeuerungsanlagen, 13. BImSchV) vom 22. Juni 1983
- (14) D e u t s c h e r Ausschuß für Stahlbeton: Empfehlungen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Außenbauteilen aus Stahlbeton, Dezember 1981
- (15) D e u t s c h e s Kupfer-Institut e.V. Hrsg.: Kupferdachdeckung, Kupferbauklempnerei, Berlin 1963
- (16) D e u t s c h e r - Stahlbau-Verband, Hrsg.: Stahlbau Arbeitshilfen, Stand 1984
- (17) I n f o r m a t i o n s s t e l l e Naturwerkstein, Würzburg, Hrsg.: Bauen mit Naturstein, Bautechnische Information, aktueller Stand 1984
- (24) Z i n k b e r a t u n g e. V., Hrsg.: Zink im Bauwesen, Lensing Verlag KG, Düsseldorf 1963
- (25) Z i n k b e r a t u n g e. V., Hrsg.: Titanzink im Bauwesen, Düsseldorf 1984

7.3 Fachbücher und Forschungsberichte

- (26) A l t e n p o h l, Dietrich: Aluminium von innen betrachtet, Aluminium-Verlag GmbH, Düsseldorf 1957
- (27) A u g u s t y n, Jan; Engeniusz, Sledziewski: Schäden an Stahlkonstruktionen. Ursachen, Auswirkungen, Verhütung. 1. Auflage, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln 1976
- (28) B r a s h o l z, Anton: Beschichtungs- und Anstrichschäden bei Alt- und Neubauten; Schadensbild, Ursache, Behebung Vorbeugung. 1. Auflage, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1981
- (29) B r a s h o l z, Anton: Der Fassadenanstrich; Untergründe, Werkstoffe, Ausführungen. 1. Auflage, Callwey-Verlag, München 1984
- (30) B r a s h o l z; Waldau; Wallenfang: Lexikon der Anstrichtechnik, Band 2, Anwendung, Callwey-Verlag, München 1975

- (31) B u n d e s m i n i s t e r i u m d e s
Innern, Hrsg.: Dritter Immissions-
schutzbericht der Bundesregierung.
Drucksache 10/1354, Bonn 18.04.1984
- (32) B u n d e s m i n i s t e r i u m d e s
Innern, Hrsg.: Bericht der Bundesre-
publik Deutschland über Ursachen und
Verhinderung von Wald-, Gewässer- und
Bautenschäden durch Luftverschmutzung.
Vorgelegt anlässlich der Multilateralen
Konferenz über Ursachen und Verhinde-
rung von Wald- und Gewässerschäden
durch Luftverschmutzung in Europa vom
24. bis 27. Juni 1984 in München
- (33) B u n d e s m i n i s t e r i u m d e s
Innern, Hrsg.: Was Sie schon immer
über Luftreinhalte wissen wollten.
1. Auflage, Verlag W. Kohlhammer GmbH,
Berlin 1983
- (34) B u n d e s m i n i s t e r i u m f ü r
Forschung und Technologie, Veranstal-
ter: 4. Statusseminar Bauforschung
und -technik, "Dauerhaftigkeit und
Substanzerhaltung von Bauwerken".
14. und 15. April 1984 in Bonn.
Sonderdruck der Bertelsmann Zeit-
schriften GmbH, Hrsg.
- (35) B u n d e s m i n i s t e r i u m f ü r
Raumordnung, Bauwesen und Städtebau:
Antwort der Bundesregierung auf die
große Anfrage des Abgeordneten Sauer-
milch und der Fraktion "Die Grünen"
vom 15. März 1984; Zivilisationsbe-
dingte Schäden an Gebäuden, Kultur-
denkmälern und Ingenieurbauwerken,
Bonn 11. Dezember 1984
- (36) C h a r i s i u s, Kurt: Bauschäden. Ihre
Ursache und Verhütung. 1. Auflage,
Verlagsgesellschaft mbH Max Lipfert,
Berlin 1948
- (37) C z e r n i n, Wolfgang: Zementchemie für
Bauingenieure. 3. Auflage, Bauverlag
GmbH, Wiesbaden und Berlin 1977
- (38) D a r t s c h, Bernhard: Konservieren, Sa-
nieren, Restaurieren: Techniken zur
Instandsetzung von und mit Beton.
1. Auflage, Beton-Verlag, Düsseldorf
1978
- (39) D e u t s c h e r B u n d e s t a g, Hrsg.:
Öffentliche Anhörung von Verbänden,
Organisationen und Sachverständigen
zum Thema: "Umweltbedingte Gebäude-
schäden". Stenographisches Protokoll
der 16. Sitzung des (16.) Ausschusses
für Raumordnung, Bauwesen und Städte-
bau, Bonn, 4. April 1984
- (40) G r o B, Hubert: Wirkungen von Luftverun-
reinigungen auf Anstriche und ähnliche
Beschichtungen. Forschungsbericht im
Auftrag des Umweltbundesamtes,
Nr. 79-104 01 046, Berlin 1979
- (41) G r u n a u, Edvard: Verhinderung von Bau-
schäden. 1. Auflage, Verlagsgesell-
schaft Rudolf Müller, Köln 1973
- (42) G r u n a u, Edvard: Lebenserwartung von
Baustoffen; Funktionsdauer von Bau-
stoffen und Bauteilen. 1. Auflage,
Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH,
Braunschweig 1980
- (43) H e i d e, Helmut; Rottenbacher, Klaus:
Untersuchungen über die Asbestemission
aus Asbestzementprodukten infolge Säure-
korrosion durch SO₂- und CO₂-haltige
Stadt- und Industrieluft. Forschungs-
bericht im Auftrag des Umweltbundes-
amtes, Nr. 82-106 08 002, Berlin 1982
- (44) H e i n z, Ingo: Volkswirtschaftliche Ko-
sten durch Luftverunreinigungen.
2. Auflage, Verkehrs- und Wirtschafts-
verlag Borgmann, Dortmund 1983
- (45) H e n n i n g, Otto; Knöfel, Dietbert:
Baustoffchemie. Eine Einführung für
Bauingenieure und Architekten. 2. Auf-
lage, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und
Berlin 1980
- (46) H i e r l, G.; Scholze, Horst: Untersuchun-
gen zum Schutz mittelalterlicher Glas-
fenster. Forschungsbericht im Auftrag
des Umweltbundesamtes, Nr. 80-106 08 005,
Berlin 1980
- (47) H o n o l d, Richard: Reinigung, Schutz und
Konservierung von Außenfassaden.
1. Auflage, Bauverlag GmbH, Wiesbaden
und Berlin 1979
- (48) H u b e r, H.; Jörg, Fritz: Einfluß gas-
förmiger Schadstoffe aus der Umwelt
auf Polymere (Teil I).
Forschungsarbeit im Auftrag des Um-
weltbundesamtes, Nr. 107 08 001,
Berlin 1980
- (49) H u b e r t y, J.M.: Fassaden in der Witte-
rung: Regen, Staub und Patina auf Be-
ton und Stein. 1. Auflage, Beton-Ver-
lag, Düsseldorf 1983
- (50) I n f o r m a t i o n s z e n t r u m
Raum und Bau der Fraunhofer-Gesell-
schaft, Hrsg.: Bauschäden, Entstehung,
Vermeidung, Beseitigung. Eine Litera-
turdokumentation. IRB Themendokumenta-
tionen Nr. 1, Stuttgart 1982

- (51) J ö r g , F.; Schmitt, D.; Ziegahn, K.-F.: Einfluß gasförmiger Schadstoffe aus der Umwelt auf Polymere (Teil II). Forschungsarbeit im Auftrag des Umweltbundesamtes, Nr. 106 08 001/01, Berlin 1982
- (52) K a r s t e n , Rudolf: Bauchemie für Studium und Baupraxis. 6. Auflage, Lüdtke-Verlagsgesellschaft M.B.H., Heidelberg 1976
- (53) K l o p f e r , Heinz: Anstrichschäden, Strukturen, Verhaltensweisen und Schadensformen von Anstrichen und Kunststoffbeschichtungen. 1. Auflage, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1976
- (54) K n o b l a u c h , Harald: Bauchemie. 1. Auflage, Werner Verlag GmbH, Düsseldorf 1978
- (55) K n ö f e l , Dietbert: Baustoffkorrosion. 2. Auflage, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1982
- (56) K n ö f e l , Dietbert: Holzschutz. 2. Auflage, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1982
- (57) K n ö f e l , Dietbert: Bautenschutz mineralischer Baustoffe. 1. Auflage, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1979
- (58) L a d e , Karl; Winkler, Adolf: Ursachen der Putz- und Anstrichschäden. 1. Auflage, Carl Maurer Verlag, Geislingen 1956
- (59) L a m e r s , R.; Oswald, R.; Rogier, D.; Schnapauff, V.: Konstruktionsempfehlungen zur Altbaumodernisierung - Außenwände und Fensteranschlüsse. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (in Vorbereitung)
- (60) L u c k a t , Siegbert: Quantitative Untersuchung des Einflusses von Luftverunreinigungen bei der Zerstörung von Naturstein. Forschungsbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes, Nr. 81-106 08 003/02, Berlin 1981
- (61) L u l e y , H.; Kind-Barahauskas, F.; Klose, N.; Mecher H.; Preis, W.: Ausbessern von Stahlbetonoberflächen. Ein Leitfaden für den Auftraggeber von Instandsetzungsmaßnahmen. Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, Köln (Hrsg.) (noch nicht veröffentlicht)
- (62) O e t e r e n , Karl A. van: Konstruktion und Korrosionsschutz. Curt R. Vincentz Verlag, Hannover 1967
- (63) O e t e r e n , Karl A. van: Korrosionsschutz Beschichtungsschäden auf Stahl. Ursache, Abhilfe, Vermeidung, Band 1., 1. Auflage, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1979
- (64) O e t e r e n , Karl A. van: Korrosionsschutz - Beschichtungsschäden auf Stahl. Ursache, Abhilfe, Vermeidung, Band 2., 1. Auflage, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1980
- (65) O e t e r e n , Karl A. van: Feuerverzinkung und Beschichtung gleich Duplex-System. 1. Auflage, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1983
- (66) R o s e n t h a l , N.K.; Alexejew, S.N.: Korrosion von Stahlbeton in aggressiver Industrieluft. 1. Auflage, VEB-Verlag für Bauwesen, Berlin 1979
- (67) R u f f e r t , Günther: Schäden an Betonbauwerken. 1. Auflage, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH, Köln-Braunsfeld 1982
- (68) R u f f e r t , Günther: Ausbessern und Verstärken von Betonbauteilen. 1. Auflage, Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf 1977
- (69) S a s s e , H.R.: Baustoff Handbuch der Altbausanierung. 1. Auflage, Otto Elsner Verlagsgesellschaft mbH & Co, KG, Darmstadt 1980
- (70) S c h ä f f l e r , Hermann: Baustoffkunde 2. Auflage, Vogel-Verlag, Würzburg 1980
- (71) S c h i k o r r , G.: Korrosionsverhalten von Zink, Band 1, Verhalten von Zink an der Atmosphäre, Metall-Verlag GmbH, Berlin
- (72) S c h i l d , E.; Oswald, R.; Rogier, D.; Schweikert, H.; Schnapauff, V. (Abb.): Schwachstellen - Schäden, Ursachen, Konstruktions- und Ausführungsempfehlungen, Band II: Außenwände und Öffnungsanschlüsse, 3. Auflage, Bauverlag Wiesbaden und Berlin 1983
- (73) S c h i l d , E.; Oswald, R.; Rogier, D.; Schweikert, H.; Schnapauff, V. (Abb.): Konstruktionsempfehlungen zur Altbausanierung - Bauteile im Erdreich. 1. Auflage, Bauverlag Wiesbaden und Berlin 1980
- (74) S c h ö n b u r g , Kurt: Korrosionsschutz durch Anstriche, Beläge und Spritzmetallisierung. 1. Auflage, VEB-Verlag für Bauwesen, Berlin 1970
- (75) S c h ö n b u r g , Kurt: Bauschäden sind vermeidbar. 1. Auflage, VEB-Verlag für Bauwesen, Berlin 1975

- (76) S c h o l z, Wilhelm: Baustoffkenntnis. 9. Auflage, Werner-Verlag, Düsseldorf 1980
- (77) U m w e l t b u n d e s a m t, Hrsg.: Luftreinhaltung '81, Materialien zum zweiten Immissionsschutzbericht der Bundesregierung an den Bundestag nach § 61 Bundes-Immissionsschutzgesetz. Erich Schmidt Verlag, Berlin 1981
- (78) U m w e l t b u n d e s a m t, Hrsg.: Jahresbericht 1982
- (79) U m w e l t b u n d e s a m t, Hrsg.: Jahresbericht 1983
- (80) U m w e l t b u n d e s a m t, Hrsg.: Umweltforschungsreport 1982/83, Band 5, Berlin 1984
- (81) U m w e l t b u n d e s a m t, Hrsg.: Daten zur Umwelt 1984, Erich Schmidt Verlag, Berlin 1984
- (82) W e b e r, Helmut: Fassadenschutz. 2. Auflage, Expert-Verlag, Grafenau 1983
- (83) W e s c h e, Karlhans: Baustoffe für tragende Bauteile, Band 2, Beton. 2. Auflage, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1981
- (84) W e s c h e, Karlhans: Baustoffe für tragende Bauteile, Band 3, Metallische Stoffe, Stahl, Aluminium, Metallkorrosion. 2. Auflage, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1985
- (85) W e s c h e, Karlhans: Baustoffe für tragende Bauteile, Band 4, Holz, Kunststoffe, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1973
- (86) W i h r, Rolf: Restaurierung von Steindenkmälern. Ein Handbuch für Restauratoren, Steinbildhauer, Architekten und Denkmalpfleger. 1. Auflage, Verlag D.W. Callwey, München 1980
- (87) W i f t, C. A.; Haller, D.: Korrosionsverhalten von Zink, Band 4, Verhalten von Zink in Verbindung mit bituminösen Baustoffen. Hrsg.: Zinkberatung e.V., Düsseldorf 1977
- (88) A u g u s t i n, Friedrich: Aggressive Umwelteinflüsse Kontra Wirtschaftlichkeit von Beton. In: Hoch- u. Tiefbau, Zürich 32 (1979), Nr. 3, Seite 50 - 51
- (89) A u t o r e n k o l l e k t i v: Carbonatisierung des Betons. Einflüsse und Auswirkungen auf den Korrosionsschutz der Bewehrung. In: beton, Düsseldorf 22 (1972), Nr. 7, Seite 296 - 299
- (90) B a l k o w s k i, Frank Dieter: Außenputze haben eine Funktion. In: Baugewerbe, Köln 58 (1978), Nr. 11 - 12, S. 58-62
- (91) B a y e r i s c h e s Landesamt für Umweltschutz, Hrsg.: Symposium über Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Menschen, München, 21. Oktober 1983
- (92) B ö t t c h e r, Günther: Fenster in Waschbetonfassaden. Verätzung der Fensterscheiben durch Kalkwasser. In: Deutsches Architektenblatt, Stuttgart 12 (1980), Heft 12, Seite 1674
- (93) B ö t t c h e r, Peter: Verbesserung des Langzeitverhaltens von Holzbauteilen durch Oberflächenbehandlung. In: Bautenschutz und Bausanierung, Zürich/Göppingen 6 (1983), Nr. 4, Seite 147 - 154
- (94) B r o o k m a n n, K.: Reinigungsmittel für anodisierte Aluminiumfassaden. In: Aluminium, Düsseldorf 54 (1978), Heft 8, Seite 505 - 509
- (95) B u n d e s m i n i s t e r i u m für Forschung und Technologie, Hrsg.: Schäden an Gebäuden und wertvollen Bau- denkmälern. In: Journal, Nr. 5, 1984
- (96) D e n n e l e r, Wolfgang: Lebensdauer von Bauteilen. In: db (Deutsche Bauzeitung), Stuttgart 111 (1977), Heft 12, Seite 52 - 58
- (97) D i e r k s, K.: Erhaltungszustand einer bewehrten Verblendschale aus Ziegelmauerwerk nach 50-jähriger Standzeit in Großstadtatmosphäre. In: Kurzbericht aus der Bauforschung, Stuttgart 25 (1984), Heft 3, Seite 169 - 175
- (98) D o g a n o f f, J.: Sanierung von Fassaden. In: DBZ (Deutsche Bauzeitschrift), Gütersloh 32 (1984), Heft 8, Seite 1061 - 1063
- (99) D o l l, Karl-Heinz: Schäden an Naturstein und ihre Beseitigung. In: DBZ (Deutsche Bauzeitschrift), Gütersloh 26 (1978), Heft 12, Seite 1711 - 1714
- (100) E l l e r, Herbert: Korrosionsschutz im Stahlbau. In: DBZ (Deutsche Bauzeitschrift), Gütersloh 32 (1984), Heft 9, Seite 1201 - 1209

7.4 Fachaufsätze

- (101) F a l l e r, F.E.; Sauter, W.: Schichtdickenveränderung an anodisierten Aluminiumbauteilen bei Freibewitterung.
In: Aluminium, Düsseldorf 59 (1983), Heft 2, Seite 117 - 122
- (102) F e l d m e y e r, F.; Schmid, J.; Stiell, W.: Mehrscheiben-Isolierglas. Was der Architekt bei der Planung der Fenster beachten soll.
In: Bundesblatt, Wiesbaden 34 (1985), Heft 5, Seite 287 - 288
- (103) G e n e r a l d e b a t t e 1979: Betonschutz und Betonsanierung.
In: Das Deutsche Malerblatt, Stuttgart 50 (1979), Heft 6, Seite 513 - 516
- (104) G e n e r a l d e b a t t e 1981: Kalksandstein, seine Prüfung und die Notwendigkeit der anstrichtechnischen Behandlung.
In: Mappe, München 94 (1981), Heft 8, Seite 623 - 628
- (105) G o d a r d, Hugh P.: Die atmosphärische Korrosion bei Baumetallen.
Übersetzt aus: The engineering journal, Juli 1953
- (106) G r i m m e, D.; van Oeteren, K.A.; Pötzsckke, M.; Schwenk, W., Hrsg.: Korrosion und Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe im Hoch- und Ingenieurbau. 2. Korrosionum, veranstaltet vom Verein Deutscher Eisenhüttenleute in Zusammenarbeit mit der Deutschen Gesellschaft für Metallkunde und dem Gemeinschaftsausschuß Verzinken am 14., 15. und 16. Januar 1976 in Düsseldorf
- (107) G r ü n, Wolfgang: Verunreinigte Großstadtluft und ihre Wirkung auf Bauwerke.
In: Architekt und Ingenieur, Frankfurt a. M. 16 (1965), Heft 10, Seite 17 - 20
- (108) G r ü n, Wolfgang: Schutz von Fassaden vor schädlichen Einwirkungen.
In: Architekt und Ingenieur, Frankfurt a. M. 19 (1968), Heft 9, Seite 4 - 8
- (109) G r u n a u, Edvard: Lebenserwartung von Dichtstoffen im Hochbau,
In: Plasticonstruction, München 6 (1976) Heft 3, Seite 89 - 92
- (110) G r u n a u, Edvard: Rostsprengung in einem schlanken Betonpfeiler
Aus Bauschäden lernen; Analysen typischer Bauschäden aus der Praxis.
Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH, Köln 1979
- (111) G r u n a u, Edvard; Mathar, Otto: Fassadenverschmutzung.
In: Baugewerbe, Köln 64 (1984), Heft 10, Seite 10 - 15
- (112) G r u n a u, E.; Honold; Mathar; Reinigung von Fassaden.
In: Baugewerbe, Köln 64 (1984), Heft 20, Seite 38 - 45
- (113) H a s e l b a c h, Manfred: Oberflächenverhalten von Kupferbauteilen an der Atmosphäre. Deutsches Kupfer-Institut, Hrsg., DKI Sonderdruck in: IKZ 4/ 1973
- (114) H a s e l b a c h, Manfred: Regenfallrohre aus Kupferblech; Korrosion der Rohre infolge Einwirkung von Faulgasen.
In: Deutsches Architektenblatt, Stuttgart 6 (1974), Nr. 1, Seite 58
- (115) H a u c k, Walther: Fassadenbekleidung aus weißemallichten Stahlblechen; Vermeidbare Fassaden-Verschmutzung.
In: Deutsches Architektenblatt, Stuttgart 12 (1980), Nr. 9, Seite 1208
- (116) H o f f, H.: Luftbelastung in Nordostbayern.
In: GI-Haustechnik, Bauphysik, Umwelttechnik, München 105 (1984), Heft 4, Seite 190 - 192, 201
- (117) H o f f m a n n, Dirk; Roß, Helmut; Wechselwirkung zwischen Schwefeldioxid und Kalkmörteln.
In: Materialprüfung 19 (1977), Nr. 8, Seite 300 - 304
- (118) H o n o l d, Richard: Verschmutzungen durch Silikonkautschukdichtungsmassen auf der Fassade.
In: Baugewerbe, Köln 62 (1982), Nr. 11, Seite 32 - 34
- (119) H u b e r, Hansjörg; Jörg, Fritz: Einfluß von Stickoxiden auf Kunststoffe.
In: Staub-Reinhaltung der Luft, Düsseldorf 35 (1975), Nr. 5, Seite 184 - 187
- (120) H u b e r, Hansjörg; Jörg, Fritz: Einfluß gasförmiger Schadstoffe aus der Umwelt auf Polymere.
In: Staub-Reinhaltung der Luft, Düsseldorf 38 (1978), Nr. 8, Seite 340
- (121) H u b e r, Hansjörg; Jörg, Fritz: Einfluß von Stickstoffdioxid auf Polymere.
In: Staub-Reinhaltung der Luft, Düsseldorf 39 (1979), Nr. 6, Seite 211 - 215

- (122) I n s t i t u t für Bauforschung, Hrsg.:
Bauschäden - Die Verteilung der Ursachen.
In: Hoch- u. Tiefbau, Zürich 30 (1977),
Nr. 2, Seite 42
- (123) J ö r g, Fritz; Schmitt, Diether; Ziegahn,
Karl-Friedrich: Die Wirkung von Stick-
oxiden (NO_x) auf Polymere - Teil I.
In: Staub-Reinhaltung der Luft, Düssel-
dorf 44 (1984), Nr. 6, Seite 276 - 280
- (124) J u n g e r m a n n, Bernhard: Der Chemis-
mus der Carbonatisierung von Beton.
In: Betonwerk und Fertigteiltechnik,
Wiesbaden 48 (1982), Heft 6, Seite
358 - 362
- (125) K e u t z l e r, O.; Hoff, P.; Verhalten
eines großen Aluminiumdaches während
vieljähriger Bewitterung in Industrie-
atmosphäre. Sonderdruck aus: Aluminium,
Düsseldorf 50 (1974), Heft 8, Seite
530 - 532
- (126) K l o p f e r, H.: Außenanstriche auf Bau-
teilen an Außenwänden, Verfärbungen in-
folge Einwirkung von Schwefelwasser-
stoff.
In: Deutsches Architektenblatt, Stutt-
gart 5 (1973), Nr. 20, Seite 1665 - 1666
- (127) K l o p f e r, H.: Außenwand mit lackierten
Aluminiumblechen - Abblättern der Lak-
kierung.
In: Deutsches Architektenblatt, Stutt-
gart 7 (1975), Nr. 12, Seite 653
- (128) K l o p f e r, H.: Schäden an Kunststoffbe-
schichtungen und -anstrichen - eine
Übersicht.
In: Plasticonstruktion, München 6 (1976),
Heft 3, Seite 84 - 88
- (129) K l o p f e r, H.: Die Carbonalisation von
Sichtbeton und ihre Bekämpfung.
In: Bautenschutz und Bausanierung,
Zürich/Göppingen 1 (1978), Nr. 3,
Seite 86 - 97
- (130) K n ö f e l, Dietbert: Schnellanalyse beton-
angreifender Wässer.
In: Beton, Düsseldorf 26 (1976), Heft 1,
Seite 19 - 21
- (131) K n ö f e l, Dietbert: Ursachen der Natur-
steinverwitterung - Natursteinschäden
an Bauwerken, Teil II.
In: Bautenschutz und Bausanierung,
Zürich/Göppingen 3 (1980), Nr. 3,
Seite 96 - 103
- (132) K n ö f e l, Dietbert: Schäden und Ober-
flächenschutz an Fassaden.
In: Aachener Bausachverständigentage
1983, Hrsg. von Schild, Erich: Bauver-
lag, Wiesbaden und Berlin 1983
- (133) K n ö f e l, Dietbert; Böttcher, K.G.:
Zum Einfluß SO_2 -reicher Atmosphäre auf
Zementmörtel.
In: Bautenschutz und Bausanierung,
Zürich/Göppingen 8 (1985), Nr. 1,
Seite 1 - 5
- (134) K ö n e k e, Rolf: 3 cm Betonüberdeckung -
Rettung vor Korrosionsschäden?
In: Baugewerbe, Köln 60 (1980), Nr. 5,
Seite 35 - 40
- (135) K o l l e r, Johann: Die Ursachen der Ver-
witterungsschäden an Baustoffen im
Freien.
In: Schweizer Baublatt, Rueschlikon 77
(1978), September, Seite 27 - 36
- (136) K o l l e r, Johann: Ursachen der Verwite-
rungsschäden an steinartigen Baustoffen.
In: Bautenschutz und Bausanierung,
Zürich/Göppingen 2 (1979), Nr. 1,
Seite 8 - 12
- (137) K o l l m a n n, H.; Strubel, G.: Unter-
suchungen über Ausblühungs- und Treib-
erscheinungen durch Sulfate.
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik,
Wiesbaden (1979), Heft 10. Seite 609 -
613
- (138) K o r f m a c h e r, Jürgen: Ausblühungen
an Sichtmauerwerk; Ursachen-- Vermei-
dung - Behebung.
In: Mappe, München 90 (1976), Nr. 6,
Seite 356 - 358
- (139) L a b m a n n, Erdwin: Die Technische An-
leitung zur Reinhaltung der Luft 1983
In: GI-Haustechnik, Bauphysik, Umwelt-
technik, München 104 (1983), Heft 5,
Seite 217 - 220
- (140) L u c k a t, Siegbert: Ein Verfahren zur
Bestimmung der Immissionsrate gasförm-
iger Komponenten.
In: Staub-Reinhaltung der Luft, Düssel-
dorf 32 (1972), Nr. 12, Seite 484 - 486
- (141) L u c k a t, Siegbert: Die Wirkung von Luft-
verunreinigungen beim Steinzerfall.
In: Staub-Reinhaltung der Luft, Düssel-
dorf 33 (1973), Nr. 7, Seite 283 - 285
- (142) L u c k a t, Siegbert: Quantitative Unter-
suchung des Einflusses von Luftverun-
reinigungen bei der Zerstörung von Na-
turstein.
In: Staub-Reinhaltung der Luft, Düssel-
dorf 41 (1981), Nr. 11, Seite 440 - 442
- (143) M a u s f e l d, F.: Atmospheric corrosion
rates, time-of-wetness and relative
humidity.
In: Werkstoff und Korrosion, Weinheim
30 (1979), Nr. 1, Seite 38 - 42

- (144) M e i e r, Hermann G.: Ausblühungen und Ausblutungen an Bauwerken, Ursachen und Beseitigung.
In: Das Baugewerbe, Köln 55 (1975), Nr. 9, Seite 38 - 39
- (145) M e i e r, U.: Schäden und Schädigungsmechanismen bei Kunststoffen.
In: EMPA-Publikationen 31 (1976)
Separatdruck aus Material und Technik, Düsseldorf 3 (1975), Nr. 4, Seite 131 - 136
- (146) M ü l l e r - G o l c h e r t, Wolfgang: Saurer Angriff aus der Luft.
In: Mappe, München 102 (1982), Nr. 11, Seite 772 - 776
- (147) N. N. (G.P.W.):
Was ist die Gerontologie des Anstrichs?
In: Mappe, München 90 (1976), Nr. 4, Seite 197
- (148) N. N.:
Die Reparatur von Schäden an Stahlbetonkonstruktionen.
In: Hoch- u. Tiefbau, Zürich 29 (1976), Nr. 7/8, Seite 16, 18
- (149) N. N.:
Erhalten und Sanieren von Natursteinmauerwerk.
In: Das Deutsche Malerblatt, Stuttgart 46 (1975), Nr. 8, Seite 529 - 532
- (150) O e l s n e r, G.: Verhalten von Aluminiumwerkstoffen bei atmosphärischer Beanspruchung.
In: Galvanotechnik, Saulgau 73 (1982), Nr. 3, Seite 216 - 222
- (151) O e t e r e n, K. A. van: Korrosionsschutz von Ingenieur-Stahlbauwerken durch Beschichtungen.
In: Der Sachverständige, München 3 (1976), Heft 7 - 8, Seite 211 - 215
- (152) P i s t o r i u s, Heinz: Zwei Schadensfälle: Anstriche auf Kalksandstein-Mauerwerk.
In: Das Deutsche Malerblatt, Stuttgart 50 (1979), Nr. 3, Seite 186 - 189
- (153) P r o b s t, Michael: Betonkorrosion/Beton-sanierung.
In: db (Deutsche Bauzeitung), Stuttgart 117 (1983), Nr. 10, Seite 75 - 87
- (154) R i e d e r e r, Josef: Die Wirkungslosigkeit von Luftverunreinigungen beim Steinerfall.
In: Staub-Reinhaltung der Luft, Düsseldorf 33 (1973), Nr. 1, Seite 15 - 19
- (155) R o n e s, J.: Reinigungsmittel auf saurer Basis für anodisierte Aluminiumbauteile.
In: Aluminium, Düsseldorf 53 (1977), Nr. 8, Seite 493 - 496
- (156) R ü c k e r t, J.; Neubauer, F.; Zietelmann, C.: Einfluß von bituminösen Dachbelagsmaterialien auf das Korrosionsverhalten von Dachentwässerungssystemen aus Zink und verzinktem Stahl. Hrsg.: Gemeinschaftsausschuß Verzinken
Bericht Nr. 91, Sonderdruck aus "Werkstoffe und Korrosion" 34, Weinheim 34 (1983), Seite 355 - 364
- (157) R u f f e r t, Günther: Ausbesserung tieferreichender Schäden mit Spritzbeton.
In: Bautenschutz und Bausanierung, Zürich/Göppingen 3 (1980), Nr. 4, Seite 137 - 140
- (158) R u f f e r t, Günther: Schadstoffe der Luft zerstören den Beton.
In: VDI-Nachrichten, Nr. 1/2, Januar 1981, Seite 6
- (159) R u f f e r t, Günther: Typische Schäden bei bewitterten Außenbauteilen aus Beton im Hochbau.
In: Betonfertigteile und Betonwerkstein, Köln 10 (1982), Nr. 1, Seite 14 - 16
- (160) R u f f e r t, Günther: Umwelt belastet zunehmend die Gebäudesubstanz.
In: VDI-Nachrichten, Nr. 16, 22. April 1983
- (161) R u f f e r t, Günther: Nicht alles liegt am sauren Regen - Betonschäden - woher sie kommen und wie man ihr Herr wird.
In: Baugewerbe, Köln 64 (1984), Nr. 14, Seite 10 - 16
- (162) R u f f e r t, Günther: Saurer Regen-ohne Einfluß auf Betonschäden?
In: beton, Düsseldorf 34 (1984), Heft 12, Seite 511
- (163) R u f f e r t, Günther: Ursachen, Vorbeugung und Sanierung von Sichtbetonschäden.
In: Aachener Bausachverständigentage 1985, Hrsg.: Schild, Erich; Oswald, Rainer: Bauverlag, Wiesbaden und Berlin 1985
- (164) S c h m i d, Kurt: Kalkausscheidungen.
In: Bau, Zürich 57 (1978), Nr. 7, Seite 377
- (165) S c h m i d, Peter: Jedem "Angriff" kann man zuvorkommen.
In: Bauwirtschaft, Wiesbaden 32 (1978), Heft 29, Seite 1184 - 1186
- (166) S c h ö n b u r g, Kurt: Schutz chemisch stark beanspruchter Bauwerksteile mineralischer Stoffgrundlage.
In: Bauplanung - Bautechnik, Berlin 32 (1978), Heft 8, Seite 366 - 369

- (167) S c h u m a n n, Dieter: Feuchtigkeitschäden - Salzschäden - Mauerwerkssanierung.
In: Bautenschutz und Bausanierung, Zürich/Göppingen 6 (1983), Nr. 1, Seite 10 - 14
- (168) S i m a t u p a n g, Masuli, H.: Ober eine Methode zum Nachweis der Ursachen von Verfärbungen auf Sichtbeton.
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik, Wiesbaden 43 (1977), Heft 2, Seite 87 - 88
- (169) S o r e t z, Stefan:
Korrosion von Betonbauten - ein neues Schlagwort?
Sonderdruck ohne nähere Angabe
- (170) S n e t h l a g e, Rolf, Arendt, Claus:
Steinkonservierung; Konservierungsmittel und Konservierungsmethoden.
In: db (Deutsche Bauzeitung), Stuttgart 115 (1981), Nr. 11, Seite 68 - 80
- (171) S n e t h l a g e, Rolf, Arendt, Claus:
Reinigung von Naturwerkstein aus der Sicht der Denkmalpflege.
In: Bautenschutz und Bausanierung, Zürich/Göppingen 6 (1983), Nr. 2, Seite 42 - 50
- (172) W e b e r, Helmut: Steinkonservierung - Planung und Ausführung.
In: Bautenschutz und Bausanierung, Zürich/Göppingen 2 (1979), Nr. 1, Seite 20 - 26
- (173) W e b e r, Helmut: Schutz von Sichtmauerwerk gegen witterungsbedingte Einflüsse.
In: Das Deutsche Malerblatt, Stuttgart 50 (1979), Nr. 5, Seite 397 - 401
- (174) W e b e r, Helmut: Beurteilung und Sanierung von Betonoberflächen.
In: Bautenschutz und Bausanierung, Zürich/Göppingen 4 (1981), Nr. 1, Seite 23 - 27
- (175) W e b e r, Helmut: Konservierung und Restaurierung von Natursteinen, 2. Teil.
In: Das Deutsche Malerblatt, Stuttgart 53 (1982), Nr. 9, Seite 756 - 761
- (176) W e b e r, Helmut: Schädigung von Baustoffen und Gebäuden durch den sauren Regen.
In: Deutsche Wohnungswirtschaft, Düsseldorf 36 (1984), Heft 1, Seite 9 - 12
- (177) W e i g l e r, Helmut: Beton - ein dauerhafter Baustoff - Anforderungen und Möglichkeiten.
Sonderdruck aus: Das Bauzentrum 5 (1981), Verlag Das Beispiel, Darmstadt
- (178) W e s c h e, Karlhans, Yakut, Efes:
Der Kölner Dom in aggressiver Atmosphäre.
In: Mitteilungen der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft), 1980, Nr. 3, Seite 7 - 9
- (179) W e y e r, Peter: Wird Beton zum Werkstoff der Vergangenheit? Ein Beitrag zum Thema Umweltbelastungen an Betonbauwerken.
In: Berliner Bauwirtschaft, Wiesbaden 1982, Heft 17, Seite 388 - 391
- (180) W i t t, C. A.; Tenbrock, S.: Oxidations-säurenkorrosion durch Dachdeckungsbitumen.
In: Werkstoffe und Korrosion, Weinheim 31 (1980), Heft 1, Seite 21 - 27
- (181) W i t t, C. A.: Verhalten bituminöser Werkstoffe unter UV-Bestrahlung.
Hrsg.: Zinkberatung Düsseldorf
- (182) Z a l l m a n n z i g, Jutta: Die Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Natursteine.
Vortrag im Rahmen des HdT-Kurses: "Bauschäden im Ruhrgebiet" am 25. 04. 1985 in Essen
- (183) Z i e g a h n, Karl-Friedrich: Materialkorrosion durch Luftverschmutzungen. Tagungsbericht über das Kolloquium der VDI-Kommission Reinhaltung der Luft vom 17. bis 19.04.1984 in Köln.
In: Staub-Reinhaltung der Luft, Düsseldorf 45 (1985), Heft 3, Seite 103-105
- (184) Z i m m e r m a n n, Günter: Dachdeckung aus Kupferblech. Verschmutzung von Sichtbetonaußenwänden durch abgeschwemmte Korrosionsprodukte u. a.
In: Deutsches Architektenblatt, Stuttgart 6 (1974), Nr. 1/2, Seite 57
- (185) Z i m m e r m a n n, Günter: Beeinträchtigungen von Bauwerken - Bauschäden, Beschädigungen, Abnutzung und Alterung.
In: Deutsches Architektenblatt, Stuttgart 8 (1976), Nr. 3, Seite 193 - 194
- (186) Z i m m e r m a n n, Günter: Verschmutzung von Fassaden.
In: Deutsches Architektenblatt, Stuttgart 10 (1978), Nr. 12, Seite 1337 - 1338
- (187) Z i m m e r m a n n, Günter: Hinterlüftete Außenwandschale aus beschichteten Asbestzementtafeln. Vermeidbare Verschmutzung der Fassade.
In: Deutsches Architektenblatt, Stuttgart 12 (1980), Nr. 4, Seite 551

-
- (188) Z i m m e r m a n n, Günter: Putzfassade und Stahlbetonattika. Vermeidbare Fassaden-Verschmutzung.
In: Deutsches Architektenblatt, Stuttgart 13 (1981), Nr. 3, Seite 396
- (189) Z i m m e r m a n n, Günter: Innenliegende kastenförmige Zinkblech-Dachrinne auf Kunststoff-Sicherheitsrinne. Korrosion des Zinkbleches.
In: Deutsches Architektenblatt, Stuttgart 13 (1981), Nr. 5, Seite 767-768
- (190) L u c k a t, Siegbert: Die Einwirkungen von Luftverunreinigungen auf die Baustanz des Kölner Doms IV.
Kölner Domblatt, 1977, 42, Seite 151 - 188
- (191) R o g i e r, Dietmar; Lamers, Reinhard: Langzeitbewährung von Flachdächern (Forschungsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, abgeschlossen 1984)