

26

SCHADENFREIES BAUEN

Herausgegeben von Ralf Ruhnau  
Begründet von Günter Zimmermann

Robert Engelfried, Helena Eisenkrein

# Schäden an polymeren Beschichtungen

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Fraunhofer IRB  Verlag

Robert Engelfried, Helena Eisenkrein

## Schäden an polymeren Beschichtungen



# Schadenfreies Bauen

Herausgegeben von Dr.-Ing. Ralf Ruhnau

Begründet von Professor Günter Zimmermann

Band 26

## Schäden an polymeren Beschichtungen

Von

Dr.-Ing. Robert Engelfried

Dipl.-Ing. Helena Eisenkrein

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Fraunhofer IRB Verlag



## Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-8672-6

ISBN (E-Book): 978-3-8167-8727-3

Redaktion: Manuela Wallißen

Umschlaggestaltung: Martin Kjer

Layout: Martin Kjer

Herstellung: Tim Oliver Pohl

Satz: Manuela Gantner – Punkt, STRICH.

Druck: Ungeheuer + Ulmer, Ludwigsburg

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

Die hier zitierten Normen sind mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e. V. wiedergegeben. Maßgebend für das Anwenden einer Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© by Fraunhofer IRB Verlag, 2012

Fraunhofer-Informationszentrum

Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 711 970-2500

Telefax +49 711 970-2508

E-Mail: [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

<http://www.baufachinformation.de>

# Fachbuchreihe Schadenfreies Bauen

Bücher über Bauschäden erfordern anders als klassische Baufachbücher eine spezielle Darstellung der Konstruktionen unter dem Gesichtspunkt der Bauschäden und ihrer Vermeidung. Solche Darstellungen sind für den Planer wichtige Hinweise, etwa vergleichbar mit Verkehrsschildern, die den Autofahrer vor Gefahrstellen im Straßenverkehr warnen.

Die Fachbuchreihe **SCHADENFREIES BAUEN** stellt in vielen Einzelbänden zu bestimmten Bauteilen oder Problemstellungen das gesamte Gebiet der Bauschäden dar. Erfahrene Bausachverständige beschreiben den Stand der Technik zum jeweiligen Thema, zeigen anhand von Schadensfällen typische Fehler auf, die bei der Planung und Ausführung auftreten können, und geben abschließend Hinweise zu deren Sanierung und Vermeidung.

Für die tägliche Arbeit bietet darüber hinaus die Volltextdatenbank **SCHADIS** die Möglichkeit, die gesamte Fachbuchreihe als elektronische Bibliothek auf DVD oder online zu nutzen. Die Suchfunktionen der Datenbank ermöglichen den raschen Zugriff auf relevante Buchkapitel und Abbildungen zu jeder Fragestellung ([www.irb.fraunhofer.de/schadis](http://www.irb.fraunhofer.de/schadis)).

## Der Herausgeber der Reihe:

Dr.-Ing. Ralf Ruhnau ist ö. b. u. v. Sachverständiger für Betontechnologie, insbesondere für Feuchteschäden und Korrosionsschutz. Als Partner der Ingenieurgemeinschaft CRP GmbH Berlin und in Fachvorträgen befasst er sich neben der Bauphysik und der Fassadenplanung vor allem mit Bausubstanzbeurteilungen. Er war mehrere Jahre als Mitherausgeber der Reihe aktiv und betreut sie seit 2008 alleinverantwortlich.

## Der Begründer der Reihe:

Professor Günter Zimmermann war von 1968 bis 1997 ö. b. u. v. Sachverständiger für Baumängel und Bauschäden im Hochbau. Er zeichnete 33 Jahre für die **BAUSCHÄDEN-SAMMLUNG** im Deutschen Architektenblatt verantwortlich. 1992 rief er mit dem Fraunhofer IRB Verlag die Reihe **SCHADENFREIES BAUEN** ins Leben, die er anschließend mehr als 15 Jahre als Herausgeber betreute. Er ist der Fachwelt durch seine Gutachten, Vortrags- und Seminaraktivitäten und durch viele Veröffentlichungen bekannt.

## Vorwort des Herausgebers zur zweiten Auflage

Beschichtungen von Bauteiloberflächen sind zur gezielten Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, zum Schutz oder auch nur zur optischen Gestaltung der Oberflächen das Mittel der Wahl. Ebenso vielfältig wie die Einsatzmöglichkeiten von Beschichtungen sind jedoch auch die Mängel und Schäden und die daraus resultierenden Schadensbilder. Von der Systemauswahl über die Materialwahl bis zur Verarbeitung ist die Anfälligkeit für Mängel groß. In den elf Jahren seit Erscheinen der Erstauflage dieses Buches sind die gestellten Anforderungen an Beschichtungen ständig gewachsen und damit haben leider auch die Schadensfälle im Zusammenhang mit polymeren Beschichtungen zugenommen.

Da Beschichtungen in aller Regel auch bei fachgerechter Materialwahl und Applikation eine geringere Lebensdauer als die darunter befindlichen Bauwerke haben, sind Schäden aber nicht zwangsläufig vom Planer oder Ausführenden zu verantworten. Die richtige Schlussfolgerung aus den vielfältigen Schadensbildern auf die jeweilige Ursache zu ziehen, erfordert einen großen Erfahrungsschatz und Kenntnis der Materialien und deren Wechselwirkung.

An diesem großen Erfahrungsschatz lassen uns die Autoren in dieser zweiten Auflage des Bandes 26 SCHÄDEN AN POLYMEREN BESCHICHTUNGEN aus der Fachbuchreihe SCHADENFREIES BAUEN teilhaben. Mit der differenzierten Schilderung von Schadensmechanismen und deren Erscheinungsbildern anhand hervorragenden Bildmaterials vermitteln die Autoren, Frau Dipl.-Ing. Helena Eisenkrein und Herr Dr.-Ing. Robert Engelfried, dem Leser in komprimierter Form das Basiswissen, um Mängel an Beschichtungen zu erkennen und richtig zu deuten und bei der Planung Fehler zu vermeiden.

Den Autoren sei für dieses Buch, das sowohl dem Planer als auch dem Sachverständigen eine wertvolle Hilfe für den Berufsalltag bietet, herzlich gedankt; an Beschichtungen kommt kein Bauwerk vorbei!

Berlin, im Juni 2012  
Ralf Ruhnau

# Vorwort der Autoren zur zweiten Auflage

Die erste Ausgabe des Bandes 26 mit dem Titel SCHÄDEN AN POLYMEREN BESCHICHTUNGEN basierte einerseits auf einer zehnjährigen Tätigkeit des Autors im Malerhandwerk und den dort gewonnenen praxisbezogenen Erfahrungen. Letztlich aber ganz wesentlich auf der ca. 35-jährigen beruflichen Begleitung von Prof. Dr.-Ing. Heinz Klopfer, zunächst an der FMFA Stuttgart und danach am Lehrstuhl Bauphysik der Universität Dortmund.

In den letzten zehn Jahren befasste sich der Autor im Zusammenhang mit Forschungs- und Entwicklungsprojekten an der Universität Dortmund eigenverantwortlich mit selektiven Themenstellungen zu dem Bereich Bautenschutz/Beschichtungen und übte darüber hinaus auf diesem Gebiet die Tätigkeit des ö. b. u. v. Sachverständigen aus. Auf einer Teilstrecke dieses Weges ist er von der Mitautorin begleitet worden.

Aus dem Wunsch des Fraunhofer IRB Verlags nach einer Überarbeitung der ersten Ausgabe entwickelte sich daraus das gemeinsame Vorhaben der aktualisierten und erweiterten Darstellung von SCHÄDEN AN POLYMEREN BESCHICHTUNGEN.

Der Anlass dazu wurde von uns einerseits in der Tatsache gesehen, dass in den letzten zehn Jahren die Anforderungen an den Schutz von Bauwerken gegen Betriebs- und Umgebungseinwirkungen allgemein und von Industriebauwerken im Besonderen deutlich gestiegen sind. Dabei spielen neben der anzustrebenden langfristigen Gebrauchstauglichkeit von Schutzmaßnahmen gleichbedeutend auch beanspruchungsabhängige Kurzzeitbeständigkeiten eine Rolle.

Des Weiteren ist es uns ein besonderes Bedürfnis, dem Trend der nicht nachlassenden Schädigung von polymeren Beschichtungen entgegenzuwirken.

Die Neuauflage hatte nicht das Ziel oder den Anspruch, auf der Basis von einschlägigen Normen, Bauvorschriften und Regelwerken die Ursachen von Fehlern, Mängeln und Schäden aufzuklären oder deren Vermeidung daraus herzuleiten. Gleichwohl soll vermerkt werden, dass ohne diese Standards eine Gesamtdarstellung der »allgemein anerkannten Regeln des Standes der Technik der Beschichtungen im Bauwesen« nicht möglich ist.

Dieses Buch verschreibt sich vor allem den Strukturen und Verhaltensweisen von Beschichtungsstoffen und Beschichtungen und deren anwendungstechnischen Voraussetzungen. Dabei spielen die Wissenschaftsbereiche Bauchemie,

speziell die sogenannte Lacktechnologie sowie die Bauphysik, und hier insbesondere die feuchtephysikalischen Zusammenhänge, eine gewichtige Rolle.

Herdecke / Gladbeck, im Juni 2012

Robert Engelfried

Helena Eisenkrein

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
2	Vom Beschichtungsstoff zur Beschichtung	17
2.1	Bestandteile der Beschichtungsstoffe	17
2.2	Klassifizierung der Beschichtungsstoffe	19
2.3	Bindemittelarten	22
2.4	Maßnahmen im Vorfeld des Beschichtens	31
2.5	Vorbereitung und Vorbehandlung der Baustoffoberfläche	32
2.6	Verarbeitung der Beschichtungsstoffe	38
2.7	Verfestigung zur Beschichtung	43
2.8	Alterung, Ertüchtigung, Neubeschichtung	46
3	Offen zutage tretende Schäden	49
3.1	Klassifizierung der Schäden	49
3.2	Farb-, Helligkeits- und Glanzänderungen (A)	53
3.2.1	Allgemeine Aspekte	53
3.2.2	Farb- und Helligkeitsänderungen	53
3.2.3	Glanzänderungen	61
3.3	Belegung der Beschichtungsoberfläche (B)	64
3.3.1	Ablagerungen	64
3.3.2	Organischer Bewuchs	68
3.4	Imperfektionen der Beschichtungsoberfläche (I)	73
3.5	Risse (R)	84
3.5.1	Risse in der Aufsicht betrachtet	84
3.5.2	Risse im Querschnitt betrachtet	93
3.5.3	Rissüberbrückende Beschichtungen	97
3.6	Hohlraumbildung (H)	104
3.6.1	Erscheinungsformen	104
3.6.2	Blasen mit nachrangiger Bedeutung	109

3.6.3	Pin holes – pin blisters	113
3.6.4	Schaumblasen	122
3.6.5	Osmotische Blasen	124
3.6.6	Kapillardruckinduzierte Blasen	138
3.6.7	Beulenbildung aus mechanischer Einwirkung	139
3.7	Verbundversagen (V)	145
3.7.1	Erscheinungsformen	145
3.7.2	Ursachen eines schlechten Haftverbunds	147
3.8	Zersetzungserscheinungen (Z)	154
3.8.1	Übermäßige Erweichung oder Versprödung	154
3.8.2	Chemische Zersetzung	156
3.8.3	Abwitterung	158
3.8.4	Mechanischer Abtrag	160
4	Visuell nicht erkennbare Mängel	163
4.1	Vertragswidrige Beschichtungsstoffe	163
4.2	Vertragswidrige Schichtdicken und Schichtaufbauten	164
4.3	Vereinbarungswidrige Funktion der Beschichtung	169
4.4	Unzureichende Verbundfestigkeit	177
	Literaturverzeichnis	187
	Stichwortverzeichnis	195

# 1 Einleitung

Historisch gesehen ist das Tätigkeitsfeld ›Beschichtungen im Bauwesen‹ aus dem Malerhandwerk heraus entstanden. Demgemäß benutzt man die Bezeichnung ›Beschichtung‹ als Oberbegriff für verschiedene, relativ dünne, hoch spezialisierte Materialschichten, die auf dem Baustoff fest haften. Sie werden durch Beschichten des Baustoffs – meist mit einem flüssigen Stoff – erzeugt. Dünnere und dickere Beschichtungen – man bezeichnet sie auch als Anstriche, Lackierungen, Versiegelungen, Imprägnierungen und Lasuren – sind in diesen Oberbegriff eingeschlossen.

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts sind Spezialbetriebe für diese Baubranche entstanden, die z. B. Fassadenanstriche, Wärmedämmverbundsysteme, Bodenbeschichtungen, Betonschutz und Betoninstandsetzung, Korrosionsschutz an Stahlbauwerken und Bauwerksabdichtungen auf Kunststoffbasis ausführen. Von ihrer Arbeitsweise her sind es Handwerksbetriebe. Sie bezeichnen sich als Bautenschutzbetriebe, weil sie in erster Linie den Schutz von Bauwerken bzw. von Bauteilen gegen Umfeld- und Nutzungsbeanspruchungen verfolgen. Sie heben sich ab vom klassischen Malerbetrieb, der sich durch das Anstreichen von Bauteilen vor allem der Verschönerung (daher der Begriff des Farbanstrichs) von Bauwerken (innen und außen) verschrieben hat.

Die sich früher ›Lack- und Farbenfabriken‹ nennenden Betriebe beziehen von der Großchemie organische und anorganische Rohstoffe und entwickeln, rezeptieren und produzieren daraus Werkstoffe für Beschichtungen im Bauwesen. Sie bezeichnen sich heute meistens als bauchemische Betriebe.

Das technische Personal der Werkstoffhersteller und der Ausführungsunternehmen setzt sich entsprechend den besonderen Aufgabenstellungen überwiegend aus Chemikern, Ingenieuren, Technikern und Handwerkern zusammen.

Die in den letzten Jahrzehnten entwickelten Bautenschutzmethoden waren oft neuartig, nicht nur hinsichtlich des ihnen zugrunde liegenden Wirkungsprinzips, sondern auch bezüglich der eingesetzten Werkstoffe und der Verarbeitungstechniken. Daher haben Beschichtungen im Bauwesen in der zurückliegenden Zeit zunehmend an Bedeutung gewonnen. Durch Publikation, Normung und Regelung hat sich diese Entwicklung manifestiert. Im internationalen Vergleich können die in Deutschland erzeugten und eingesetzten Beschichtungsstoffe und die praktizierten Systemanwendungstechniken im Bauwesen als führend angesehen werden.



Übergeordnetes Ziel dieses Buches ist es, Schäden an Beschichtungen zu vermeiden, um die Gebrauchstauglichkeit einer Oberflächenschutzmaßnahme über einen möglichst langen Nutzungszeitraum sicherzustellen. Dieses Buch soll aber auch all denen, die mit Beschichtungen im Bauwesen befasst sind, eine Hilfe sein, wenn bei auftretenden Schäden oder bei Streitigkeiten geklärt werden muss, ob und warum ein Schaden eingetreten ist, ob die ausgeführten Beschichtungsarbeiten fach- und vertragsgemäß waren, ob Fehler bei der Herstellung oder Verarbeitung von Werkstoffen gemacht wurden und ob mit dem Schaden das planmäßige Leistungsvermögen des Schutzsystems erschöpft ist.

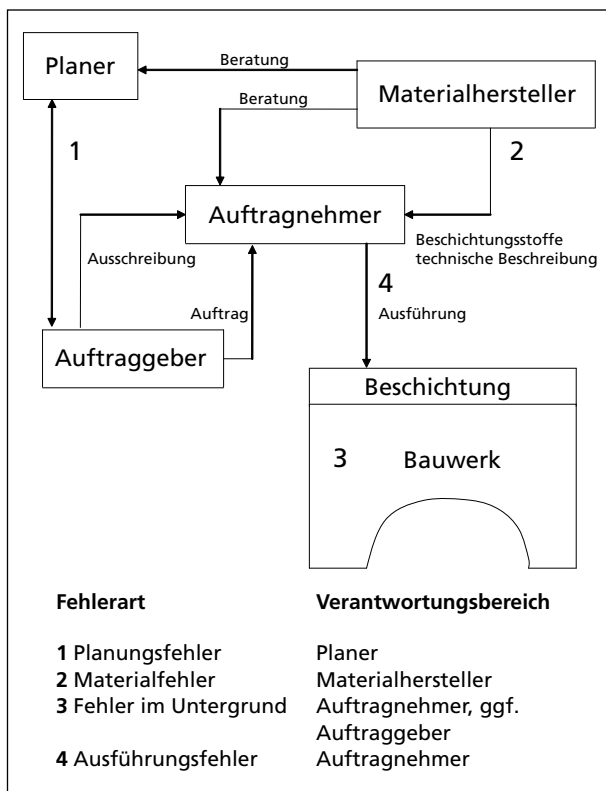
Weil man von einer Bautenschutzmaßnahme häufig jedoch noch eine weitergehende Gebrauchstauglichkeit erwartet als es durch Gewährleistungsvereinbarungen z. B. nach VOB oder BGB festgelegt worden ist, wird auch der Fall von Interesse, dass man einen danach eintretenden Verschleiß- oder Schadenszustand objektiv und qualifiziert untersucht, analysiert und bewertet, um eine Basis für Bauwerksunterhaltungsmaßnahmen zu schaffen.

Damit ließe sich dann fundiert ein bautenschutztechnisches Konzept für eine Ergänzungsbeschichtung, evtl. in Verbindung mit einer Bauteil-Instandsetzungsmaßnahme, für die weitere planmäßige Nutzungsdauer erstellen.

In Bild 1 sind die Beziehungen aufgezeigt, welche die an einem Bauwerk Beteiligten am Zustandekommen einer Beschichtung zueinander haben: Der Auftraggeber stellt ein Bauwerk zur Verfügung, an dem er, unterstützt durch einen sachkundigen Planer, Beschichtungsarbeiten ausführen lässt. Dazu sucht der Auftraggeber/Planer über die sogenannte Ausschreibung den zu den günstigsten Bedingungen arbeitenden Auftragnehmer. Dieser bezieht die erforderlichen Beschichtungsstoffe von einem Materialhersteller. In der Regel berät der potenzielle Materialhersteller den Auftraggeber/Planer und den Verarbeiter im Vorfeld der Auftragsvergabe bezüglich des Einsatzes und des Leistungsvermögens der anzuwendenden Werkstoffe.

Wenn später Schäden auftreten, ist es von Bedeutung, ob diese dem Verantwortungsbereich des Materialherstellers, des Verarbeiters, des Planers oder des Auftraggebers zugeordnet werden müssen. Hierbei ist auch der Zeitpunkt der Schadensentstehung von Bedeutung.

In Bild 2 sind entlang einer Zeitachse diejenigen Daten bzw. Zeitspannen genannt, die den Zyklus einer Beschichtungsmaßnahme bestimmen. Die sogenannte Gewährleistungsfrist des Auftragnehmers für eine Beschichtung ist in aller Regel wesentlich kleiner als die Nutzungsdauer des Bauwerks. Auch kann man davon ausgehen, dass die Periode der Gebrauchstauglichkeit einer Beschichtung größer ist als die in den Regelwerken vorgegebenen Gewährleistungsfristen. Wenn innerhalb der Gewährleistungsfrist ein Mangel an der



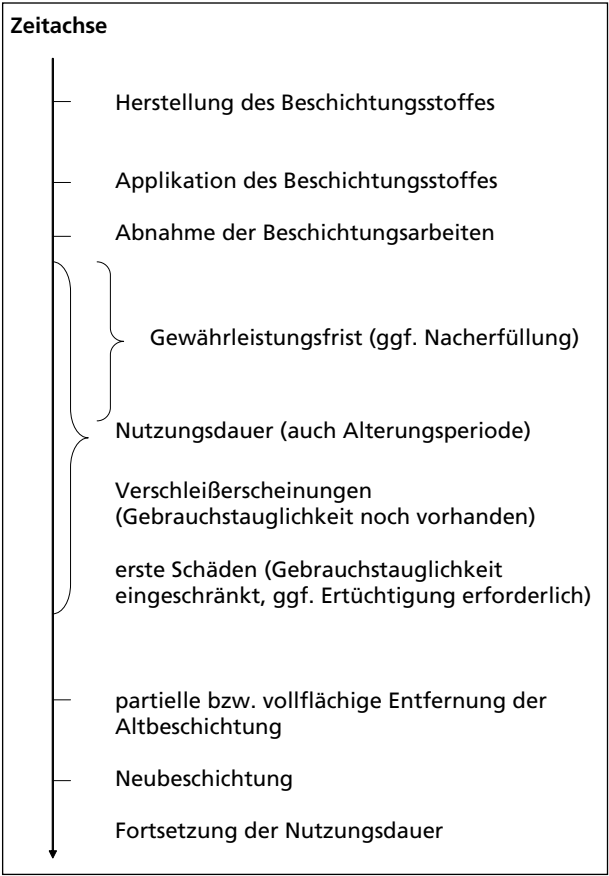
**Bild 1** ■ Verantwortungs-  
bereiche für Fehler

Beschichtung offenbar wird, muss der Auftragnehmer ihn beseitigen, d.h., die zugesicherte Leistung nacherfüllen.

Relevant im rechtlichen Sinne ist tatsächlich nicht, ob ein Schaden vorliegt, sondern ob ein Mangel gegeben ist. Nach § 13, Absatz 1 der VOB/B [1], die meist auch Beschichtungsarbeiten zugrunde liegt, wird vom Auftragnehmer verlangt:

*»Der Auftragnehmer hat dem Auftraggeber seine Leistung zum Zeitpunkt der Abnahme frei von Sachmängeln zu verschaffen. Die Leistung ist zur Zeit der Abnahme frei von Sachmängeln, wenn sie die vereinbarte Beschaffenheit hat und den anerkannten Regeln der Technik entspricht. Ist die Beschaffenheit nicht vereinbart, so ist die Leistung zur Zeit der Abnahme frei von Sachmängeln,*

- 1. wenn sie sich für die nach dem Vertrag vorausgesetzte, sonst*
- 2. für die gewöhnliche Verwendung eignet und eine Beschaffenheit aufweist, die bei Werken der gleichen Art üblich ist und die der Auftraggeber nach der Art der Leistung erwarten kann.«*



**Bild 2** ■ Zyklus einer Beschichtungsmaßnahme

Dieses Buch ist in drei große Kapitel aufgeteilt:

In **Kapitel 2** wird erläutert, aus welchen Stoffen und nach welchen Grundsätzen Beschichtungsstoffe hergestellt werden und wie aus diesen auf dem betreffenden Bauteil die Beschichtung erst entsteht. Dieses Kapitel wurde für notwendig gehalten, weil die meisten Bauschaffenden diese Zusammenhänge nicht genügend kennen, denn diese junge Sparte des Bauwesens hat noch nicht ausreichend Eingang in die Lehrpläne der Ausbildung der Baufachleute gefunden. Dabei werden dem Ziel dieses Buches folgend an den betreffenden Stellen in Kapitel 2 die dort möglicherweise auftretenden Schadensquellen aufgezeigt.

In der Regel werden Beschichtungen dann beanstandet, wenn sie innerhalb der Gewährleistungsfrist ein ungewöhnliches Verhalten zeigen, das als funktionsbeeinträchtigend empfunden bzw. erkannt wird. Deshalb ist ein großer

Teil der Darlegungen in diesem Buch den damit meist verbundenen sogenannten Schadensformen und Ursachen gewidmet. Diese werden in Kapitel 3 eingehend beschrieben. Die wichtigsten Schadensbilder von Baubeschichtungen werden anhand von Fotos mit kurzen textlichen Beschreibungen veranschaulicht. So kann beim Vorliegen eines Schadensbildes eine erste Orientierung gewonnen werden.

Die Gliederung dieses Kapitels orientiert sich am Erscheinungsbild der festgestellten Veränderungen, weil dieses normalerweise der Ausgangspunkt aller weiteren Untersuchungen ist.

Die in Kapitel 3 beschriebenen Schadensformen sind zum Teil auch nur Hinweise auf mögliche Sachmängel. Eine Beschichtung kann jedoch auch mangelhaft sein, ohne dass ein Schaden auf den ersten Blick erkennbar ist. Eine erkennbare Schadensform braucht andererseits nicht zwingend ein Sachmangel zu sein. Sie kann z. B. das Ende der planmäßigen Gebrauchstauglichkeit der Beschichtung anzeigen. Sie kann aber auch auf nicht zu erwartende Fremdeinflüsse zurückgehen.

In Kapitel 4 sind die visuell nicht erkennbaren Sachmängel beschrieben, die für Beschichtungen spezifisch sind. Es handelt sich dabei um vertragswidrige Leistungen des Auftragnehmers, die ohne genauere Untersuchungen gar nicht oder manchmal nur für einen daraufhin geschulten Fachmann erkennbar sind. Diesen Mängeln fehlt also ein ohne Weiteres erkennbares Erscheinungsbild, wie es die unter Kapitel 3 beschriebenen Schäden haben. Dies geht z. B. darauf zurück, dass Beschichtungen meist aus nicht exakt vereinbarten Beschichtungsstoffen erzeugt werden. Sie werden gelegentlich in nicht vertragsgemäßen Schichtdicken oder Schichtenfolgen ausgeführt oder haben einen unzureichenden Haftverbund zwischen den einzelnen Teilschichten oder zwischen der Beschichtung und ihrem Untergrund. Auch ist es in vielen Fällen nicht möglich, bestimmte Funktionen einer Beschichtung, wie etwa das Diffusionsverhalten gegen Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) oder Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ), die Rissüberbrückungsfähigkeit oder die Beständigkeit gegen chemische oder mechanische Beanspruchungen durch einfache Untersuchungen festzustellen.

Die Autoren hoffen, dass dieses Buch die Erwartungen der Leser erfüllt, bitten jedoch trotzdem ihre Leser, ihnen offen gebliebene Fragen oder Probleme, kritische Bemerkungen und Anregungen über den Verlag zuzuleiten. Sie bedanken sich dafür im Voraus.



## 2 Vom Beschichtungsstoff zur Beschichtung

### 2.1 Bestandteile der Beschichtungsstoffe

Der Schutz von Baustoffoberflächen mit Beschichtungen erfordert das Auftragen von zunächst flüssigen Werkstoffen, sogenannten Beschichtungsstoffen, auf die Oberfläche. Für diese Werkstoffe ist charakteristisch, dass sie als wichtigsten Bestandteil ein **Bindemittel** enthalten, das im hier betrachteten Fall eine organische, hochmolekulare Substanz ist [47], oder nach dem Verarbeiten zu einer solchen wird. Derartige hochmolekulare Substanzen heißen »Polymere«. Sie sind nahe Verwandte der inzwischen im täglichen Leben weitverbreiteten Kunststoffe. Sie zeichnen sich durch Dauerhaftigkeit und chemische Widerstandsfähigkeit aus, durch Haftvermögen und eine nicht poröse, jedoch quellbare, amorphe Struktur, die in vielerlei Hinsicht derjenigen einer erstarrten Flüssigkeit entspricht. Daher sind fast alle Polymerbindemittel auch weitgehend durchsichtig. Im Temperaturbereich von etwa  $-20$  bis  $+80^\circ\text{C}$  ist ihr Deformationsverhalten zwischen sprödhart und duktil weich angesiedelt. Dieses Verformungsverhalten kann – sofern es per se nicht in der gewünschten Art im Polymerbindemittel vorhanden ist – durch Zugabe von **Weichmachern** [48] beeinflusst werden. Zulässig sind nur solche Weichmacher, die zeitabhängig nicht migrieren – umgangssprachlich ausschwitzen –, da dies eine unzulässige Versprödung der Beschichtung zur Folge hätte. Auch auf der Bindemittelbasis Zement, Kalk und Wasserglas, ggf. unter Zusatz eines organischen Polymerbindemittels, werden Beschichtungswerkstoffe hergestellt [49].

Außer dem polymeren Bindemittel, das in Kapitel 2.3 ausführlicher behandelt wird, enthalten die hier zur Debatte stehenden Werkstoffe überwiegend noch weitere Stoffkomponenten, wie Pigmente, Füllstoffe, Lösemittel bzw. Wasser sowie Hilfsstoffe.

**Pigmente** sind farbintensive, feinkörnige Feststoffteilchen von etwa  $0,1$  bis  $1,0\mu\text{m}$  Korngröße [50]. Sie dienen in erster Linie zur Farbgebung des sonst lichtdurchlässigen Bindemittels bzw., zur weitgehenden Abhaltung des Lichts, insbesondere der UV-Strahlung, welche auf fast alle Polymerbindemittel und auf manche Baustoffe schädigend wirkt. Pigmente sind unlöslich (im Gegensatz zu Farbstoffen). Sie müssen durch das Bindemittel gut benetzbar und für die meisten Anwendungen chemisch möglichst hoch beständig sein. Sie müssen ein hohes Deck- und Färbevermögen aufweisen. In Beschichtungen für den Korrosionsschutz von Stahlbauteilen werden sogenannte Korrosions-

schutzpigmente [51] eingesetzt, die neben den bereits genannten Eigenschaften in der Beschichtung besondere korrosionsverhindernde bzw. korrosionsmindernde Wirkungen entfalten.

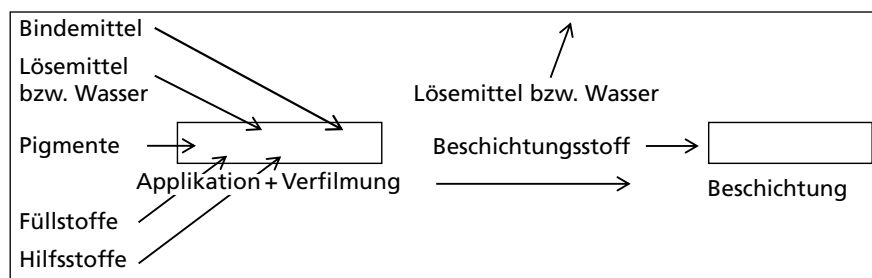
Füllstoffe [50] werden verwendet, um dem Beschichtungswerkstoff bestimmte Eigenschaften zu verleihen, z.B. um die Schichtdicke pro Verarbeitungsvorgang zu steigern, die mechanische Widerstandsfähigkeit der Beschichtung und die Zwischenschichthaftung zu verbessern, das Schrumpfmaß und die thermische Längenänderung zu reduzieren usw. Ihr Einsatz anstelle größerer Anteile an Pigmenten hat aber auch eine kostensenkende Wirkung. Als Füllstoffe dienen vorzugsweise mineralische Pulver mit Korngrößen zwischen etwa 1 und etwa 30 µm. Die obere Grenze der Teilchengröße sollte ein Drittel der späteren Schichtdicke nicht überschreiten. Auch Füllstoffe sollten immer eine hohe chemische Widerstandsfähigkeit besitzen und mit dem Polymerbindemittel gut verträglich sein.

Hilfsstoffe (auch Additive genannt) [48] werden verwendet, um spezielle Wirkungen zu erzeugen, z.B. um den flüssigen Beschichtungsstoff zu entlüften und zu entschäumen, das Benetzen des zu behandelnden Untergrunds oder den Verlauf des aufgetragenen Werkstoffs zu fördern, um dem gebrauchsfertigen Werkstoff eine Strukturviskosität zu verleihen oder um das Absetzen der Füllstoffe und Pigmente im flüssigen Beschichtungsstoff im Gebinde zu verhindern oder wenigstens eine spätere Homogenisierung wieder zu erleichtern und vieles andere mehr. Hilfsstoffe sind flüssig oder pulverförmig und werden meist nur in geringen Mengen zugegeben. Sie sollen – abgesehen von der angestrebten Wirkung – das übrige Eigenschaftsbild des Werkstoffs möglichst nicht beeinflussen.

Lösemittel und Wasser [48] sind bei bestimmten Polymerbindemitteln zur vorübergehenden Verflüssigung notwendig. Des Weiteren sind sie zwecks einfacher Vermischung des Polymerbindemittels mit den übrigen Bestandteilen, zur leichteren Verarbeitbarkeit und zur Erzielung eines besseren Haftverbunds auf dem Untergrund unverzichtbar. Deshalb müssen Polymere für den hier behandelten Zweck entweder selbst flüssig (Flüssigharze) oder in Lösemittel löslich bzw. in Wasser dispergierbar sein. Der Anteil von Lösemitteln in Beschichtungsstoffen ist in den letzten Jahren deutlich zurückgefahren worden. Stattdessen hat die wasserbasierte Formulierung zugenommen. Lacktechnologische Weiterentwicklungen haben es zudem ermöglicht, den Festkörperanteil von Beschichtungsstoffen (Stichwort: high solid) zu erhöhen, um auf diesem Weg von den flüchtigen Löse- und Verdünnungsmitteln abzurücken. Der größte Vorteil von Wasser liegt darin, dass das bei der Trocknung entweichende Verflüssigungsmittel Wasser im Gegensatz zu den organischen Lösemitteln die Atmosphäre nicht belastet. Im Anwendungsbereich der Son-

derbeanspruchungen (Wasserbau, Anlagenbau etc.) halten sie dem Vergleich mit den herkömmlichen Beschichtungen hinsichtlich Qualitätsanspruch und Dauerhaftigkeitserwartung nicht immer stand. Man ist auch mehr und mehr bestrebt, neben den Lösemitteln noch andere flüchtige organische Bestandteile, sogenannte VOC (Volatile Organic Compounds) zu vermeiden, da diese Mensch und Umwelt gleichermaßen belasten können [52].

Bild 3 zeigt die Hauptbestandteile eines Beschichtungsstoffs und den Weg zur Beschichtung.



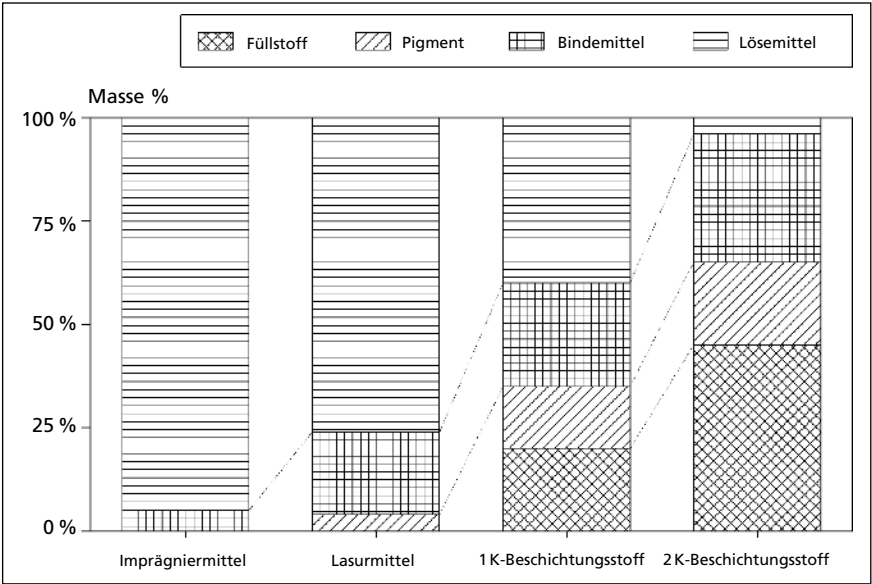
**Bild 3** ■ Die Komponenten eines physikalisch trocknenden Beschichtungsstoffs und der Übergang von flüssig (Beschichtungsstoff) nach fest (Beschichtung)

## 2.2 Klassifizierung der Beschichtungsstoffe

Vier typische Zusammensetzungen von Beschichtungsstoffen aus den in Kapitel 2.1 genannten Bestandteilen sind in Bild 4 einander gegenübergestellt. Der Bestandteil Hilfsstoff ist wegen seines geringen Mengenanteils dabei nicht berücksichtigt.

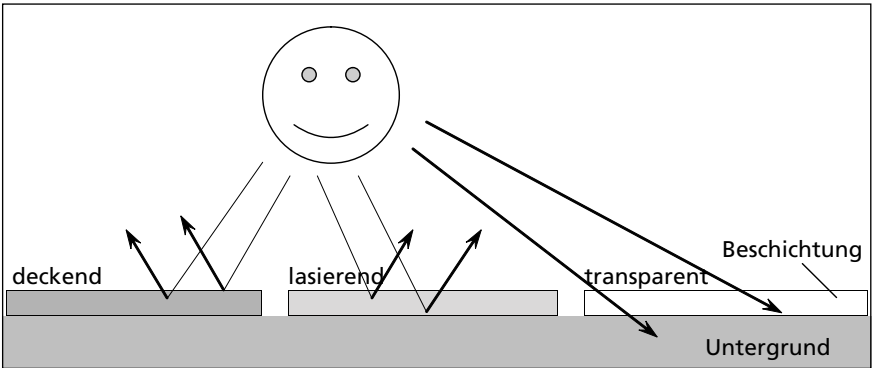
Ein **Imprägniermittel** wird danach aus relativ viel Lösemittel bzw. Wasser, einem geringen Anteil an Bindemittel und manchmal auch nur aus einem Wirkstoff hergestellt. Aus diesem Grunde ist die Viskosität sehr niedrig und da weder Pigmente noch Füllstoffe verwendet werden, kann eine solche Flüssigkeit recht gut in einen feinporigen Baustoff eindringen. Das Imprägniermittel verfilmt, indem das Lösemittel bzw. Wasser verdunstet. Zurück bleibt das Bindemittel (ggf. mit eingebundenem Wirkstoff), das auf die Porenwände in einer sehr dünnen Schicht aufrocknet. Wirkstoffbasierte Imprägniermittel werden alternativ durch Zugabe von Additiven gelartig eingestellt und können im Sinne eines Oberflächendepots bei schwach saugenden Untergründen hohe Eindringtiefen erreichen.





**Bild 4** ■ Zusammensetzung der Stofftypen Imprägniermittel, Lasurmittel, 1 K-Beschichtungsstoff und 2 K-Beschichtungsstoff

Ein **Lasurmittel** ist ein Beschichtungsstoff, der neben dem Bindemittel einen geringen Pigmentanteil und wenig oder keine Füllstoffe enthält und demgemäß in einem begrenzten Umfang lichtdurchlässig ist. Dass durch Variation des Pigmentanteils die Lichtdurchlässigkeit nach dem Verfilmen zwischen völlig undurchsichtig und völlig durchsichtig variiert werden kann, ist in Bild 5 anschaulich gemacht. Undurchsichtige Oberflächenschichten nennt man **deckend**, weil sie den Untergrund gegen das sichtbare Licht abschirmen.



**Bild 5** ■ Unterschiedliche Lichtdurchlässigkeit von deckenden, lasierenden und transparenten Beschichtungen

Pigmentfreie Oberflächenschichten sind transparent, jedoch nicht immer glas-klar, sondern z. B. aufgrund der Molekülstruktur der Polymere leicht gelblich gefärbt. Eine Lasur hat gegenüber dem Imprägniermittel grundsätzlich einen größeren Bindemittelgehalt und damit eine höhere Viskosität, denn die Lasur soll auf der Baustoffoberfläche verbleiben. Nur auf der Oberfläche eines Baustoffs kann die Lasurwirkung (das partielle Durchscheinenlassen von Strukturen des Untergrunds, z. B. eine Holzmaserung) erzeugt werden. Das Eindringen des Bindemittels in die Porenräume des Baustoffs wird beim Lasieren nicht angestrebt, und die Auftragsmenge wird so gewählt, dass mehr Bindemittel angeboten wird, als der Baustoff aufsaugt.

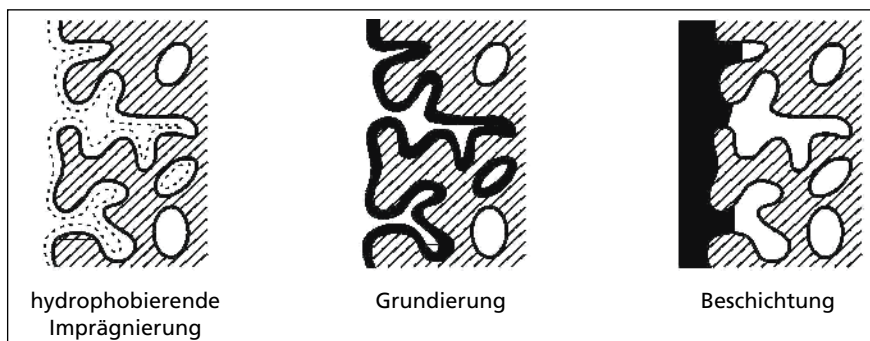
Ein **deckender Beschichtungsstoff** besteht normalerweise etwa zur Hälfte aus den flüchtigen Stoffen Lösemittel oder Wasser, während die andere, nicht flüchtige Hälfte (nämlich Bindemittel, Pigment und Füllstoff) auf dem Untergrund verfilmt und so die schützende Schicht bildet. Insgesamt liegt der fertige Beschichtungsstoff als eine Komponente vor. Er wird dann auch als **1 K-Beschichtungsstoff** bezeichnet. Es ist einleuchtend, dass bei vorgegebener Auftragsmenge die Trockenschichtdicke umso größer ausfällt, je weniger Lösemittel bzw. Wasser im Beschichtungsstoff enthalten sind.

Als Beispiel für einen Werkstoff mit einem Maximum an filmbildender Substanz ist in Bild 4 noch ein **2 K-Beschichtungsstoff** gezeigt. Dessen Erhärtung erfolgt durch chemische Reaktion zweier flüssiger, nicht flüchtiger Bindemittelvorstufen, die als **Stammkomponente** und **Härterkomponente** bezeichnet werden (siehe auch Kapitel 2.7). In wenigen Ausnahmefällen wird bei der Herstellung ein ganz geringer Anteil an Lösemittel < 3 % zugegeben, damit die Viskosität bei der Konfektionierung und der Verarbeitung günstiger liegt, was den Verlauf und das Entweichen von Luft aus dem Baustoff bzw. Filmgefüge fördert. Wenn kein Lösemittel zugegeben wird, und die Filmbildung ausschließlich durch chemische Vernetzung erfolgt, entspricht die erzielbare Trockenschichtdicke der angewandten Nassschichtdicke.

Die beiden Typen 1 K-Beschichtungsstoff und 2 K-Beschichtungsstoff sind die klassischen Ausgangsmaterialien zur Herstellung von Beschichtungen auf Baustoffen.

Umgangssprachlich, und gelegentlich auch im Schrifttum, wird im Zusammenhang mit Beschichtungsstoffen der Begriff ›Farbe‹ gebraucht. Dies ist nicht korrekt, da Farbe nach wissenschaftlicher Definition keine Substanz, sondern eine Sinnesempfindung ist. Im nicht trivialen, nicht umgangssprachlichen Bereich, d. h. auch bei der Bewertung und Begutachtung von Schäden an Beschichtungen, sollte deshalb für den Beschichtungsstoff nicht die Bezeichnung Farbe als alleinstehende Bezeichnung gebraucht werden. Einen schematischen Überblick der Staffelung von Maßnahmen des Oberflächen-

schutzes über den Einsatz von Stoffklassen und Stoffmengen auf porösen Baustoffen gibt Bild 6.



**Bild 6** ■ Hauptsächliche Maßnahmen zum Oberflächenschutz auf porösen Baustoffen in schematischer Darstellung

## 2.3 Bindemittelarten

Polymerbindemittel für den Oberflächenschutz von Baustoffen sind in zahlreichen Arten – und jede Stofftypart in zahlreichen Modifikationen – herstellbar. Hauptbestandteile der Moleküle dieser Stofftypen sind stets Kohlenstoff und Wasserstoff. Daneben findet man meist die Atome Sauerstoff, Stickstoff und etwas seltener Chlor, Silicium und Fluor. Entscheidend für die anwendungstechnischen Eigenschaften sind die chemische Molekülstruktur und die molare Masse (siehe Tabelle 1). Sie bewirken nämlich, ob die Substanz flüssig, fest, flexibel, d. h. verformbar oder hart, also nicht verformbar ist. Die chemische Struktur nimmt außerdem Einfluss auf die Kohäsion, d. h. auf den Verbund zwischen den Bindemittelmolekülen sowie zwischen Bindemittel und Pigmenten/Füllstoffen etc., aber auch auf das Haftvermögen, d. h. die Adhäsion zum Beschichtungsuntergrund, auf die Lichtechtheit, die chemische Widerstandsfähigkeit, die Härte und andere Eigenschaften. Auch die Möglichkeit, von anderen flüssigen und gasförmigen Stoffen permeiert zu werden, sowie die Beständigkeit gegen chemische und mechanische Beanspruchung und vieles andere mehr, hängen von der Molekülstruktur, d. h. vom Stofftyp und seiner Modifikation ab.

**Tabelle 1** ■ Einfluss der molaren Masse auf verschiedene Eigenschaften von Polymerbindemitteln

molare Masse [g/mol]	Molekül-Abmessung [nm]	typische Vertreter	Beschaffenheit	Polyme-risations-stufe	Änderungs-tendenz	
20	ca. 0,1	Rohstoffe zur Bindemittel-synthese	gasförmig	Monomer Oligomer  Polymer (Hoch-polymer)	Synthese	↑
100	ca. 0,2	Lösemittel	dünflüssig		↓	Alterung und Zersetzung
1.000	ca. 0,5	Flüssigharze	dickflüssig			
10.000	ca. 1	Weichmacher	klebrig			
100.000	ca. 2	Bindemittel	plastisch			
1.000.000	ca. 5	Festharz	zunehmend zäh bis hart			

Im Folgenden werden die kennzeichnenden Eigenschaften der wichtigsten Bindemittelarten [47] kurz erläutert. Spezielle Verhaltensweisen von Modifikationen werden erklärend erwähnt.

**Trocknende Öle und Alkyde (AK)** verwendet man hauptsächlich zum Schutz von maßhaltigen Holzbauteilen (z.B. Fenster) und zum Korrosionsschutz von Stahlbauteilen. Auf basisch wirkenden Baustoffen, wie zementgebundenen Mörteln und Beton, können diese Bindemitteltypen nicht eingesetzt werden, weil sie in Anwesenheit von Wasser hydrolysieren und sich zersetzen. Wegen des dabei entstehenden schmierigen Folgeprodukts spricht man auch von der Verseifung. Die Verfilmung am Objekt, d. h. der Aufbau einer polymeren Struktur erfolgt durch oxydative Trocknung [47]. Insbesondere für Bauteile im Freien dürfen nur solche Modifikationen verwendet werden, deren oxydative ›Nachhärtung‹ nicht zu einer übermäßigen Versprödung des Bindemittels führt.

**Chlorkautschuk (RUC)** wird durch Chlorieren von Kohlenwasserstoffen hergestellt. Er ist ein chemisch sehr stabiles Bindemittel. Reiner Chlorkautschuk ist eine spröde, bröselige Substanz, die nur dann verfilmt, wenn sie mit einem reichlichen Anteil Weichmacher kombiniert ist. Chlorkautschuk besitzt eine hervorragende Widerstandsfähigkeit gegen Wassereinwirkung sowie gleichermaßen gegen basische und saure Medien. Er zählte in der Vergangenheit zu den leistungsfähigsten einkomponentigen Unterwasserbeschichtungen. Weil die Flüssigphase nur unter Verwendung eines hohen Anteils an aromatischen Lösemitteln (physiologisch bedenklich) herstellbar ist, ist dieser Bindemitteltyp auf dem Rückzug.

**Copolymerisate** sind linear aufgebaute Polymere, die durch Polymerisation aus Bausteinen (Monomeren) unterschiedlicher chemischer Struktur synthetisiert werden. Beispiele häufig verwendeter Monomere und deren wichtigste Eigenschaften als Polymerisatbestandteil sind:

Vinylacetat:	haftungsverbessernd, verseifbar, flexibilisierend,
Vinylpropionat:	hart, schwer verseifbar,
Vinylchlorid:	kreidend, hart, haftungsverbessernd, unverseifbar,
Butadien:	kreidend, weichmachend, unverseifbar,
Styrol:	kreidend, hydrophobierend, unverseifbar,
Acrylat:	haftungsverbessernd, nur schwer verseifbar, lichtstabil.

Durch zweckmäßige Wahl von Art und Mengenverhältnis der Monomere sowie durch die Endgröße der Moleküle (Polymerisationsgrad) kann man die Eigenschaften dieser Polymere in weiten Grenzen verändern (modifizieren). Wegen der vielen Möglichkeiten steht eine große Zahl von Polymerisaten zur Verfügung. Einige Copolymerisate stehen heute noch in löslicher Form, die allermeisten jedoch in wässrig dispergierter Form als Bindemittel zur Verfügung. Grundsätzlich verhalten sich alle Copolymerisate bei mechanischer Belastung plastoelastisch und haben wegen des plastomeren Verformungsanteils nur eine begrenzte Temperaturbeständigkeit.

**Acrylate (AY)** sind spezielle Polymerisate, deren wichtigste Bausteine deren Ester der Acrylsäure bzw. der Methacrylsäure sind. Sie zeichnen sich durch ausreichende Beständigkeit gegen Basen (Laugen) und hohe Widerstandsfähigkeit gegen den ultravioletten (UV-)Anteil des Sonnenlichts aus. Beschichtungen mit diesem Bindemitteltyp sind deshalb ausgeprägt farb- und glanzstabil. Acrylate werden in Lösung (organische Lösemittel), insbesondere aber auch in wässrig dispergierter Phase als Bindemittel für witterungsbeanspruchte Beschichtungen mit besonderen Anforderungen an die Ästhetik eingesetzt. Pigmentierte Acrylatdispersionen sind mit die am meisten eingesetzten Bindemittelsysteme für Beschichtungen auf mineralischen Baustoffen (Beton, Putz) im Freien.

**Bitumen** als Destillationsrückstand des Erdöls ist ein schwarzes, hochviskoses, plastomeres Oligomer, das in verschiedenen Zubereitungsformen eingesetzt wird. Es lässt sich gut in Lösemitteln lösen und auch in Wasser dispergieren. Bitumen ist physiologisch unbedenklich sowie gegen Feuchte, viele Wässer, Salze, schwache Säuren und Basen beständig. In der Freibewitterung kreidet Bitumen deutlich. Nicht beständig ist es gegen Lösemittel, Fette und Öle. Durch Kombination von Bitumen mit relativ geringen Mengen von Phenolharzen, Chlorkautschuk, Mischpolymerisaten oder Kautschuk kann eine deutliche Reduzierung der Temperaturempfindlichkeit des Films (Versprödung bei Kälte, Erweichung bei Wärme) und eine Verbesserung der Wi-

derstandsfähigkeit gegen chemische Einwirkungen oder Witterungseinflüsse erreicht werden. Da sich die schwarze Beschaffenheit praktisch auf den gesamten Beschichtungsstoff überträgt, sind neben Schwarz nur gedeckte Rot-, Grün- und Silbertöne herstellbar. Die begrenzte Farbpalette und die Empfindlichkeit gegen mechanische Einwirkungen und gegen Wärme schränken die allgemeine Anwendung jedoch deutlich ein. Deswegen werden Beschichtungen auf Basis Bitumen hauptsächlich auf nicht sichtbaren, vorzugsweise auf erdberührten oder auf wasserbenetzten Bauteiloberflächen in Form von kunststoffmodifizierten Bitumendickbeschichtungen (KMB) eingesetzt [2].

**Epoxidharze (EP)** haben ihren Namen von der Stammkomponente (funktionelle Gruppe **Epoxid**) des 2K-Systems. Pigmente, Füllstoffe, usw. sind in der Regel in die Stammkomponente eingearbeitet. Die Härterkomponente enthält als charakteristischen Bindemittelbestandteil das **Amin**. Unmittelbar nach dem Vermischen der beiden Ausgangskomponenten am Verarbeitungsort setzt über die funktionellen Gruppen Epoxid und Amin eine chemische Vernetzung ein. Die dadurch bewirkte Vergrößerung der Moleküle des Bindemittels hat eine Viskositätserhöhung zur Folge (siehe Tabelle 1). Damit verbunden ist die Grenze der Verarbeitbarkeit (Topfzeit), die je nach Temperatur nach 0,5 bis 8 Stunden erreicht wird. Die Erhärtung, d. h. das Erreichen des Festkörperzustands, ist nach einigen Tagen weitgehend abgeschlossen. Abgesehen von dem chemischen Härtungssystem erreichen EP-Flüssigharze (lösemittelfrei) schneller den Endzustand als gelöste EP-Festharze.

Epoxidharze haben im Bautenschutz eine große Verbreitung, vor allem für die Anwendung auf Beton [3] und Stahl [4]. Der Grund dafür ist ihre Beständigkeit unter Wasser, gegen Basen und schwache Säuren, die hohe Festigkeit und die hervorragende Haftung auf trockenem und begrenzt feuchtem Untergrund, bei manchen Typen sogar auf Frischbeton. Generell sind eine gute Resistenz und eine gute Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beanspruchungen und gegen viele organische Lösemittel gegeben. Da Epoxidharze auch als Flüssigharze (lösemittelfrei) zur Verfügung stehen, und da die Volumenverminderung bei der Erhärtungsreaktion (Schrumpfen) relativ klein ist, werden sie auch für ausgesprochen dicke Beschichtungen (erhöhte chemische und mechanische Einwirkungen) konfektioniert. Mit diesen Modifikationen werden sogar epoxidgebundene Mörtel und Betone hergestellt. Weil die beschriebene Vernetzung der beiden Ausgangskomponenten aus physikalisch-chemischer Sicht im Zusammenhang mit dem Wärmeinhalt der Bindemittelmischung steht, sollten 2K-Epoxidbeschichtungen für höhere Nutzungsansprüche nicht bei Objekt- und Umgebungstemperaturen unter 10 °C verarbeitet werden. Diese Bedingung gilt natürlich auch für die Aushärtezeit.

Im Vergleich zu früheren Jahrzehnten haben die lösemittelbasierten Epoxide im Bauwesen heute nur noch einen geringen Anwendungsbereich. Man findet sie noch dort, wo besondere hygri-sche Anforderungen bei gleichzeitig vorhandener chemischer Beanspruchung gegeben sind und wo unabdingbare Applikations- und Vernetzungsbedingungen mit diesen eher erfüllt werden können.

Demgegenüber ersetzen wasserbasierte und weiterentwickelte High-Solid-Epoxidmodifikationen den bisherigen lösemittelhaltigen Epoxidbeschichtungsstoff.

**Polyurethane** (PUR) haben ihren Namen von der Molekül-Endstruktur des aus der Stammkomponente (Polyol) und der Härterkomponente (Isocyanat) des 2K-Systems entstandenen Bindemittels. Gegenüber den Epoxiden haben sie im Allgemeinen eine bessere Widerstandsfähigkeit im sauren Bereich. Durch Modifikation ist ein breites Spektrum vom zäh-harten (sehr verschleiß-festen) bis zum elastisch-flexiblen Bindemittel möglich. Für die Anwendung auf zementgebundenen Baustoffen ist zu beachten, dass nur unverseifbare Ausgangskomponenten (z. B. keine Polyesterpolyole) eingesetzt werden dürfen. Mit bestimmten Polyurethanen können hohe Anforderungen an Glanz-haltung und Farbkonstanz (UV-Beständigkeit) erfüllt werden. Daher haben sie eine große Bedeutung für Deckbeschichtungen. Die Vernetzung erfordert im Prinzip vergleichbare thermische Bedingungen wie bei den Epoxiden, wenngleich die Temperaturgrenze nach unten etwas erweitert werden kann. Polyurethan wird als 2K-Bindemittel vor allem für Beschichtungen und als 1K-Bindemittel (das genau genommen auch zweikomponentig ist, weil die zweite Komponente Wasser ist, das aus dem Wasserdampf der Luft oder der Feuchte des Untergrunds beschafft wird) für gut penetrierende Imprägnier-lösungen eingesetzt.

Die Härterkomponente Isocyanat ist unter bestimmten Bedingungen in der Lage, auch mit Wasser zu reagieren. Das hat beim 2K-Polyurethan eine Qua-litätsminderung zur Folge. Bei der Reaktion mit Wasser entsteht das Gas Koh-lendioxid, das den Film porig macht oder an der Haftfläche Bläschen bildet. Deshalb sollten 2K-Polyurethan-Beschichtungsstoffe nur bei eher trockenem Klima und auf lufttrockenem Untergrund verarbeitet werden. Auch die Aus-härtung sollte unter trockenen Umgebungsbedingungen erfolgen, was eine schwerwiegende Einschränkung der Anwendbarkeit im Bauwesen bedeutet.

Auch bei diesem Bindemitteltyp sind die wasserbasierten Polyurethandisper-sionen zunehmend in der Anwendung. Die Selektion der Anwendung spielt auch hier eine wichtige Rolle.

Seit einigen Jahren ist eine Modifikation der Polyurethane in den Markt eingeführt, die wegen ihrer besonderen Struktur und wegen der vom klassischen Polyurethan abweichenden Reaktionsmechanismen zwischen Isocyanat und einer Aminkomponente als **Polyurea** (PUA) bezeichnet wird. Sie zeichnen sich durch neue Leistungsmerkmale wie schnelle chemische Vernetzung, hohe Flexibilität, Hydrolysestabilität etc. aus.

**Polymethylmethacrylat** (PMMA) ist im Ausgangszustand ein einkomponentiges, flüssiges Monomerengemisch, das durch Zugabe eines nicht in die Vernetzung eingehenden Beschleunigers in den polymeren Zustand (fest) übergeht. Es härtet sehr rasch aus und ist danach ein gegen schwache Basen und Säuren, Salze und Wasser sehr beständiges, glasklares Polymer mit den allgemein bekannten Eigenschaften des Plexiglasses. Es zeichnet sich durch eine hohe Lichtstabilität und eine sehr hohe Wetterbeständigkeit aus. Die ausgeprägte Dünflüssigkeit vor dem Erhärten lässt eine sehr hohe Abmagerung mit Füllstoffen zu und begünstigt die Benetzung des Untergrunds, macht jedoch eine penetrationsbremsende Grundierung saugfähiger Baustoffe notwendig. Berücksichtigt werden muss, dass nach der Applikation des Monomerengemisches die Gefahr der Verseifung der monomeren Esterstrukturen auf basischem Untergrund besteht, woraus Haftverbundschwächen resultieren können. Die Polymerisationsreaktion hat eine gewisse Empfindlichkeit gegen Sauerstoffzutritt. Des Weiteren ist der Erhärtungsschrumpf ausgeprägter als bei den Bindemitteln EP und PUR. Den Schrumpfungsspannungen kann durch Einsatz flexibler Bindemittelvarianten entgegengewirkt werden. Die Einsatzgebiete können vielseitig sein. Gelegentlich gibt es dazu Einschränkungen, wenn die erhebliche Geruchsentwicklung durch die Monomere während der in-situ-Anwendung nicht akzeptiert werden kann.

Der (**ungesättigte**) **Polyester** (UP) hat seinen Namen vom Ausgangsprodukt, einem Monomerengemisch aus Estern und Styrol, die chemisch **ungesättigte**, nämlich Doppelbindungen, enthalten. Analog zum PMMA erfolgt die Polymerisation nach Zugabe des Beschleunigers und Applikation des Monomerengemisches auf dem Bauteil, z. B. auf Bodenflächen oder Rohrleitungen. Die Verhaltensweisen und Empfindlichkeiten während der Polymerisation sind vergleichbar mit denen des PMMA, auch die dabei entstehenden Schrumpfschpannungen. Beide Bindemitteltypen verbreiten während ihrer Flüssigphase einen intensiven Geruch, der durch die monomeren Ester und Styrol verursacht wird. Dies erfordert besondere Schutzmaßnahmen für das Verarbeitungspersonal (Filter, Belüftung). Bis auf Lichtstabilität und Wetterbeständigkeit liegen im Gebrauchszustand ähnliche Eigenschaften wie bei PMMA vor.



Unter dem Oberbegriff **Silicone** fasst man die nieder- bis hochmolekularen Silane zusammen. Hochmolekulare Silane nennt man Siliconharze, oligomere Silane werden als Siloxane bezeichnet. Die Silan-Moleküle zeichnen sich durch ihre siliciumorganische Struktur aus. Siliconharz hat Elastomercharakter, besitzt sehr hohe chemische und thermische Widerstandsfähigkeit und ist wie alle Silane stark wasserabweisend. Die kleineren Moleküle der oligomeren und niedermolekularen Silane können in einen feinporigen Untergrund besser eindringen als die wesentlich größeren Moleküle der Siliconharze. Zur Oberflächenbehandlung saugender Baustoffe werden die Silicone in Form wasserabweisender Imprägniermittel eingesetzt. Diese machen die Porenwände wasserabstoßend und unterdrücken damit die kapillare Leitfähigkeit für flüssiges Wasser. Eine Siliconimprägnierung ist nach dem Verdunsten der Lösemittel bzw. des Wassers (sie sind auch als wässrige Systeme, sogenannte **Silicon-Mikroemulsionen**, verfügbar [53]) unsichtbar, d. h. das Aussehen der Baustoffoberfläche wird nicht verändert. Die dadurch geschaffene hydrophobierende Imprägnierung grenzt man begrifflich von der Beschichtung ab, weil einerseits Größenordnungen zwischen den Schichtdicken und andererseits deutlich unterschiedliche Wirkungsmechanismen vorliegen (hydrophobe, nicht geschlossene Oberfläche – dichte Barriere gegen eindringende Medien).

In der Anfangszeit tritt beim Benetzen einer siliconimprägnierten Oberfläche ein ABERLEFFEKT auf, der aber im Laufe der Zeit nachlässt bzw. verschwindet. Die Schutzwirkung der imprägnierten Oberflächenzone gegen kapillare Wasseraufnahme ist aber dadurch noch nicht aufgehoben, wenn das Imprägniermittel tief genug in das Baustoff-Porensystem eingedrungen ist. Das tiefe Eindringen der bisher verfügbaren »wasserdünnen« siliciumorganischen Imprägniermittel ist bei Beton insbesondere mit sehr dichtem Gefüge problematisch, wenn nicht über eine Depotbildung über längere Zeit speziell konfektionierte Imprägniercremes eingesetzt werden [54]. Das Porensystem des Baustoffs wird durch eine Siliconimprägnierung nicht nennenswert eingeengt (siehe die schematische Darstellung von Bild 6). Dadurch ist es auch in seiner Gasdurchlässigkeit und Diffundierbarkeit kaum verändert. Gegen Druckwasser und gegen Dauerfeuchte sind auch hydrophobierende Imprägnierungen nicht nachhaltig wirksam.

Die Hydrophobierungswirkung der Silane hat bei dem porösen Baustoff zur Folge, dass Wasser, z. B. aus Beregnung, nicht mehr kapillar eindringt. Die Poren werden dadurch trocken gehalten. Kohlendioxid diffundiert nach wie vor und wenn in den Poren kein Wasser vorhanden ist, noch schneller in den Beton. Dies führt dazu, dass die sogenannte Carbonatisierungsfront schneller in das Bauteil hinein verschoben wird [100], d. h. hydrophobierter Beton carbonatisiert schneller als nicht hydrophobierter Beton.

Zement, Kalk und Wasserglas sind rein anorganische Bindemittel. Sie werden – jeweils getrennt – im Bauwesen nur noch in relativ geringem Umfang als Hauptbindemittel beim Oberflächenschutz eingesetzt. Sie erhärten nicht durch Verfilmung, wie die zuvor beschriebenen Polymere, sondern durch Verfilzen der bei der Erhärtung entstehenden Kristallnadeln bzw. durch Versintern [49]. Wasser dient bei allen drei Bindemitteln als Lösungsmittel und beim Zement zusätzlich als härtende Komponente (Hydratation). Kalk wird in seiner gelöschten Form als Anstrichmittel eingesetzt und erhärtet durch Aufnahme von Kohlendioxid zu Calciumcarbonat (Kalkstein). Wasserglas härtet nach Abgabe von Wasser und Aufnahme von Kohlendioxid durch Ausfällen eines Kieselsäuregels. Die sich aus Zement, Kalk und Wasserglas bildenden Schichten sind feinporig und daher gasdurchlässig. Weil sie im Prinzip die gleiche Porigkeit, Sprödigkeit und die gleiche Widerstandsfähigkeit haben wie zementgebundene Baustoffe, kann durch Anstreichen, Schlämmen und Beschichten mit Zement-, Kalk- und Wasserglasprodukten keine nennenswerte Schutzwirkung, jedoch eine Unregelmäßigkeiten ausgleichende, lasierende oder deckende Schicht erzeugt werden. Das heißt, man setzt sie eher zur Verschönerung als zum Schutz eines Bauwerks ein. Beispiele dafür sind die ›gekalkten‹ Gebäude in Mittelmeerländern. An historischen Gebäuden (Schlössern, Burgen) werden die Fassaden traditionell mit wasserglasgebundenen Anstrichen, sogenannten ›Rein-Silikatfarben‹ versehen.

Durch Kombination mit Acrylatdispersionen können Wasserglas- und Zementbindemittel in der Sprödigkeit reduziert, in der Dichtigkeit geringfügig, in den Verarbeitungseigenschaften und im Haftvermögen wesentlich verbessert werden. Aus der Kombination mit Wasserglas entstanden daraus die ›Dispersionssilikatfarben‹ [5].

Die Kombination von Zement und Acrylat bewirkt durch die Basizität des Zementes für Stahl einen Korrosionsschutz. Daher werden im Zuge der Betoninstandsetzung auf Bewehrungsstählen überwiegend Korrosionsschutz-Beschichtungsstoffe aus zementhaltigen Polymerwerkstoffen eingesetzt. Durch Steigerung des Acrylatanteils, der zudem aus einer flexibilisierten Modifikation entstammt, werden Zement-Feinsandgemische mit dichtenden und begrenzt rissüberbrückenden Eigenschaften hergestellt (flexible Dichtungsschlämme) [3], [41], [42].

Die im Vorstehenden wiedergegebenen Charakterisierungen der Bindemittel können auf die daraus hergestellten Werkstoffe weitgehend übertragen werden. Da aber durch die Konfektionierung der Bindemittel mit Pigmenten, Füllstoffen und Hilfsstoffen und durch den im Einzelfall gewählten Bindemitteltyp aus der großen Palette der zur Verfügung stehenden Modifikationen deutliche Abweichungen vom genannten Normalverhalten auftreten können,

muss sich die praktische Anwendung an der eigenen Erfahrung mit einem bestimmten Produkt oder an den Angaben des Herstellers orientieren. Diese sind im Technischen Merkblatt enthalten, das es zu jedem Beschichtungsstoff gibt und das bei dessen Anwendung beachtet werden muss. Gelegentlich ist auch eine zusätzliche Fachberatung durch das Herstellerwerk angebracht (siehe auch Bild 1).

Einen Überblick über die Widerstandsfähigkeit von Oberflächenbehandlungen auf Basis der zuvor beschriebenen Polymerbindemittel gibt Tabelle 2.

**Tabelle 2** ■ Überblick über die Widerstandsfähigkeit von Oberflächenschutzsystemen auf Basis von Polymerbindemitteln

Bindemittel-basis	Witte-rung	Dauer-feuchte	Abrieb	Rissüber-brückung	Farb-treue	Öle, Fette	schwache Säuren
Chlorkaut-schuk	±	+++	±	-	±	-	+++
Copolymerisat	++ (++)	++ (±)	± (-)	++ (++)	++ (++)	- (-)	+ (±)
Acrylat	+++ (+++)	+ (-)	± (-)	+ (+)	+++ (+++)	- (-)	+ (±)
Silicon	+++	-	-	-	farblos	-	-
Epoxid	±	+++	+++	±	±	++	++
Polyurethan	+++ -	-	+++	± bis ++	+++	± bis ++	+
Esterpolyol		++	+++	± bis ++	-	± bis ++	+++
Ätherpolyol							
Bitumen	+ (+)	+++ (+)	-	+ (+)	± (±)	-	++ (±)
Bitumen-kombination	++	+	-	+	+	-	+
Teerpech-epoxid	±	+++	++	-	-	±	++
Teerpech	±	+++	±	-	-	±	++
Wasserglas	+++	+	±	-	+++	-	-
Zement	+	+++	±	-	-	-	-

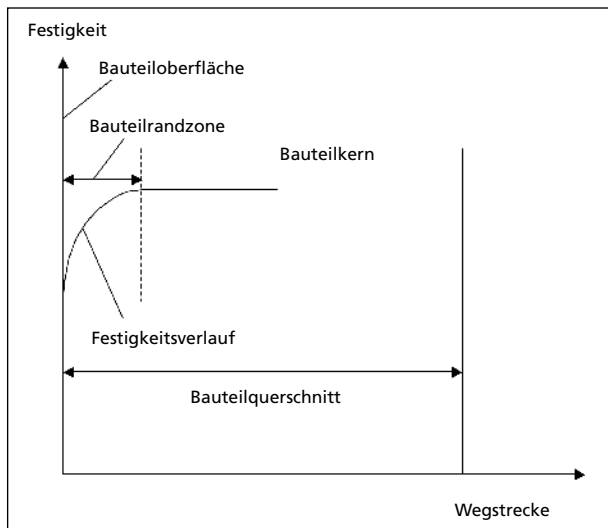
+++ sehr gut; ++ gut; + befriedigend; ± ausreichend; - nicht ausreichend  
Die Werte in Klammern gelten für Dispersionen, die anderen für lösemittelhaltige und lösemittelfreie Stoffe.

## 2.4 Maßnahmen im Vorfeld des Beschichtens

Ein erfolgreicher Einsatz der unter Kapitel 2.2 und 2.3 beschriebenen Beschichtungsstoffe erfordert stets, dass die zu schützende Oberfläche zuerst einer sachkundigen Zustandsanalyse und Beurteilung unterzogen wird. Dies ist besonders dann wichtig, wenn der Anlass einer Beschichtungsmaßnahme ein zuvor aufgetretener Schaden am betreffenden Bauobjekt ist [55]. Der Umfang der dazu notwendigen Erhebungen richtet sich nach der Größe des Objektes und der Bauteilmerkmale, die bei der Beurteilung zu berücksichtigen sind.

Das Prüfen einer Baustoffoberfläche erfolgt zunächst durch Betrachten, wobei man bereits mit bloßem Auge schädliche Substanzen, mehrende und sandende Oberflächen, rissige Bereiche, grobporige Bezirke, schlecht haftende Schichten, Rost und Rostart, Bewuchs und vieles andere erkennen kann. Durch Wischen mit der Handfläche, durch Schneiden mit einer Stahlklinge, durch Bearbeiten mit Hammer und Meißel, durch Messen der Druckfestigkeit mit dem Betonprüfhammer und durch Ermittlung der Abreißfestigkeit über aufgeklebte Stahlstempel beim Beton kann festgestellt werden, ob der zu beschichtende Untergrund die erforderliche Festigkeit und Tragfähigkeit besitzt. Bei diesem Prüfen wird nicht eine Aussage über die Druck- oder Zugfestigkeit des eigentlichen Baustoffs angestrebt, sondern es soll festgestellt werden, ob die Oberfläche frei von losen Teilchen ist und die unmittelbare Randzone des Baustoffs die qualitative Beschaffenheit aufweist, um die vorgesehene Beschichtung tragen zu können. Zu beachten ist, dass mit steigender Dicke und mit zunehmender Härte der Beschichtung die Oberflächenfestigkeit des Baustoffs ebenfalls zunehmen sollte. Bild 7 zeigt schematisch den häufig anzutreffenden Festigkeitsverlauf zementgebundener Baustoffe zwischen Oberfläche und Kernzone, wobei die Randzone eine geringere Festigkeit aufweist. Dies liegt z. B. dann vor, wenn die Witterungsbeanspruchung, ein chemischer Angriff oder Frost-Tau-Wechsel auf die Oberfläche eingewirkt hat oder wenn Beton bzw. Putz unmittelbar nach der Herstellung nicht oder unzureichend nachbehandelt worden sind.

Zur Beantwortung der Frage, ob auf Betonoberflächen eine Beschichtung als Carbonatisierungsbremse [56] erforderlich wird, sind messtechnisch entsprechende Daten zur Carbonatisierungstiefe und zur Betondeckung der Bewehrung zu erheben. Bei der Beurteilung von Rissen sind die Rissbreiten an der Oberfläche, die Korrosivität des umgebenden Klimas sowie die zu erwartende Rissbreitenänderung in Betracht zu ziehen. Mit welcher Charakteristik sich Risse bewegen, ergibt sich in der Regel aus dem Temperaturverlauf der Außenluft, dem Schwinden und Kriechen des Baustoffs und dem statischen



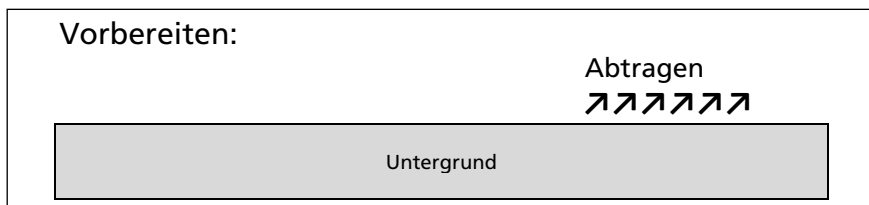
**Bild 7** ■ Festigkeitsgefälle in Randzonen zementgebundener Bauteile

System des Bauwerks [57]. Diese Daten sind zur Bemessung einer rissüberbrückenden Beschichtung von wesentlicher Bedeutung.

## 2.5 Vorbereitung und Vorbehandlung der Baustoffoberfläche

Beschichtungen leisten nur dann den planmäßig vorgesehenen Sachwertschutz, wenn sie mit dem Untergrund einen permanenten Haftverbund eingehen und beibehalten, und wenn ihre Dicke möglichst gleichmäßig und die Schicht ausreichend dick und geschlossen ist. Dazu muss der zu beschichtende Untergrund in der als notwendig erkannten Weise **vorbereitet** und ggf. **vorbehandelt** werden, damit ein **tragfähiger** und **beschichtungsgerechter** Zustand hergestellt wird.

Die zur Schaffung des tragfähigen Untergrunds möglichen Verfahren – man bezeichnet sie als **substanzabtragend** – fasst man per Definition unter dem Oberbegriff **Untergrundvorbereitung** zusammen [58]. Bild 8 veranschaulicht den Vorgang des Vorbereitens. Darunter fallen bereits so einfache Verfahren wie **Abkehren**, **Staubsaugen** oder **Abblasen** mit ölfreier Druckluft. Auch Waschen von Hand unter Verwendung von Bürsten oder Dampfstrahlgeräten, oder ein scharfer Wasserstrahl, können zur Entfernung von Schmutz und Staub ausreichend sein. Beim Waschen und Dampfstrahlen kann man dem Wasser Netzmittel, Pilze oder Algen tötende (oxidierende) Mittel oder benetzende bzw. fettlösende Zusätze beifügen.



**Bild 8** ■ Vorbereitung (abtragend) zur Schaffung eines tragfähigen Untergrunds

**Abbürsten** und **Abschleifen** werden vorgenommen, um dünne Schichten leicht haftender Teilchen von der Oberfläche zu entfernen und um ganz glatte Oberflächen aufzurauen. Dieses Ziel wird erreicht durch Abreiben mit Schleifpapier oder Schaumglas, durch maschinelles Bearbeiten mit der Schleifscheibe, dem Schwingschleifer, der Drahtbürste per Hand oder der maschinell betriebenen Topfdrahtbürste.

**Chemisches Reinigen** von Metallen, Ziegelsteinen oder zementgebundenen Baustoffen, vorzugsweise mit Phosphorsäure, erfordert vorheriges gründliches Annässen und anschließendes gründliches Nachspülen und sollte auf Ausnahmefälle beschränkt bleiben. Bei stark verunreinigten Betonflächen ist eine Säurebehandlung in Kombination mit Netzmitteln sehr wirkungsvoll, wegen der dabei entstehenden Nebenprodukte (meist lösliche Salze) jedoch nicht unproblematisch. Manchmal sind Reinigungspasten zweckmäßig, welche auf die Oberfläche aufgetragen und nach einer bestimmten Einwirkungszeit mit den aufgenommenen Verschmutzungen wieder abgewaschen werden.

Die Verfahren Klopfen, Stocken, Fräsen, Flammstrahlen, Trockenstrahlen, Feuchtstrahlen (beide mit festen Strahlmitteln), Hochdruckwasserstrahlen usw. verursachen bei mineralischen Baustoffen einen nennenswerten Substanzabtrag an der Baustoffoberfläche, und hinterlassen unterschiedliche und zum Teil unerwünscht grobe Rauheiten. Bei den metallischen Baustoffen wird durch Trockenstrahlen mit festem Strahlmittel nicht nur die Oberfläche von Rost und anderen verbundschwächenden Schichten befreit, sondern auch eine für das Haften von Beschichtungen günstige Rauheit erzeugt.

Um instabile Schichten größerer Dicke abzuschlagen, werden Hammer und Meißel, Stockhämmer und maschinenbetriebene **Fräsen** eingesetzt. Das Fräsen ist vorzugsweise auf horizontalen Flächen möglich.

**Flammstrahlen** von Naturstein oder Beton [6] mit Acetylenbrennern bringt eine Oberflächenschicht relativ konstanter Dicke von max. etwa 4 mm infolge thermischer Ausdehnung zum Abplatzen. Die Staubentwicklung ist gering, die Geräuschbelastigung hält sich in ertragbaren Grenzen. Die Ober-

fläche muss nach dem Flammstrahlen gründlich gebürstet werden, um Ruß, Schmelzgut, Spritzgut und gelockerte Teilchen zu entfernen. Bei Stahlflächen ist ebenfalls ein gründliches Bürsten nach dem Flammstrahlen erforderlich. Sowohl bei den mineralischen Baustoffen als auch auf Stahlflächen schafft das anschließende Trockenstrahlen mit festem Strahlmittel die besten Voraussetzungen für den erforderlichen Haftverbund mit der Beschichtung.

Beim **Hochdruckwasserstrahlen** von Bauteiloberflächen müssen die Pumpendrucke schon mehrere 100 bar betragen, damit z. B. auf Beton eine akzeptable Wirkung erzielt wird. Von Hand sind derartige Geräte dann nur schwer beherrschbar (siehe Bild 9). Seilgeführte, ferngesteuerte Anlagen sind zwar aufwendig, jedoch können dann auch Drücke oberhalb 300 bar angewendet werden (siehe Bild 10).

Das **Druckluft-Trockenstrahlen** mit festem Strahlmittel (Stahlkorn, Schlacke, Korund oder Quarzsand) ist das am häufigsten eingesetzte und gleichzeitig meist effektivste Verfahren zur Untergrundvorbereitung. Auch dieses Verfahren kann von Hand (Bild 11) oder ferngesteuert (Bild 12) angewendet werden. Die Intensität des Strahlens kann sehr weit variiert werden, und zwar vom leichten Überblasen (sweepen) bis zum gründlichen Abstrahlen, was beim Beton bis zur Erreichung einer waschbetonähnlichen Struktur führen kann. Die Intensität des Abtragens ist außerdem noch von der Härte und der Form des verwendeten Strahlmittels abhängig. Das Trockenstrahlen hat stets eine Staubeentwicklung zur Folge. Deshalb wird der zu strahlende Bereich in der Regel eingehaust, um den entstehenden Staub auf den Entstehungsort begrenzt zu halten.

An Bodenflächen von Stahl und Beton hat sich seit Jahren das sogenannte **Kugelstrahlverfahren** bewährt. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass es, verglichen mit dem Druckluftstrahlen unter Verwendung fester Strahlmittel, bei vergleichbarer Effizienz bezüglich des Substanzabtrags, umfeldschonend ist und das Strahlmittel recycelt werden kann. Dieses Verfahren ist auch für vertikale Flächen verfügbar.

Zum Schutz bzw. zur Schonung von Arbeitspersonal und Umfeld wurde das **Feuchtstrahlen** [59], [60] entwickelt. Dabei wird das feste Strahlmittel dosiert befeuchtet, sodass wenigstens 95 % der lungengängigen Stäube gebunden werden. Die abtragende Wirkung ist mit der des Trockenstrahlverfahrens vergleichbar. Bei diesen und den davon abgeleiteten, ähnlich wirkenden Kombi-Strahlverfahren (Wasser-Granulat) ›backen‹ die festen Strahlmittel zum Teil an der vorbereiteten Fläche an. Es wird deshalb meist ein anschließendes Spülen mit reinem Wasser erforderlich. Für Stahlflächen ergibt sich daraus, dass sich in der Zeit zwischen dem Strahlen und dem Abtrocknen des Wassers eine



**Bild 9** ■ Hochdruckwasserstrahlanwendung per Hand; ab 300 bar Druck wegen Rückstoß und Rückprall von Wasser und Sekundärabfall schwierig handhabbar; wird möglich durch Sonderkonstruktionen



**Bild 10** ■ Seilgeführte, ferngesteuerte Hochdruckwasserstrahlanlage







**Bild 11** ■ Druckluftfreistrahlen mit festem Strahlmittel; nennenswerte Umfeldbelastung durch Strahlmittel und Sekundärabfall



**Bild 12** ■ Ferngesteuertes Druckluftstrahlen mit festem Strahlmittel und besonderer Absaugvorrichtung für Strahlmittel und Sekundärabfall

dünne Flugrostschicht bildet, was die Erzielung des Vorbereitungsgrades SA 2 ½ entsprechend dem Vergleichsnorm [7] deshalb nicht ermöglicht.

Die umfassendste Regelung zur Untergrundvorbereitung liegt im Bereich Korrosionsschutz von Stahlbauteilen vor [8].

Verzinkte Stahlbauteile werden vor dem Beschichten am wirkungsvollsten durch eine ammoniakalische Wäsche (Entfernung von Fett und Zinksalzen) vorbereitet [8]. Trotz dieser Sondermaßnahmen ist bei der Wahl der anzuwendenden Beschichtungsstoffe nur ein eingeschränktes Sortiment an Stofftypen verfügbar. Die optimale Kombination von Feuerverzinken und Beschichtung ist unter der Bezeichnung Duplex System bekannt [9].

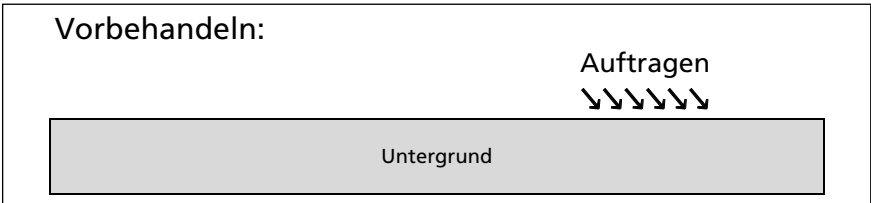
Hinweise für die Wahl der richtigen Vorbereitungsmaßnahmen gibt Tabelle 3.

Bei den porösen Baustoffen liegt in der Regel nach einer ordnungsgemäßen Untergrundvorbereitung eine feinraue bis leicht zerklüftete Struktur vor. Der für eine optimale Filmbildung (siehe auch die Kapitel 2.7, 3.4, 3.5.3 und 4.2) zwingend notwendige **beschichtungsgerechte Untergrund** wird vor dem Beschichten durch Applikation egalisierender, auf die jeweiligen Untergründe abgestimmter Spachtelschichten hergestellt. Auf Betonflächen werden hierzu die in [3] näher beschriebenen, kunststoffvergüteten Zementmörtel/Fein-

**Tabelle 3** ■ Hinweise für die Wahl des Verfahrens zur Untergrundvorbereitung

Vorbereitungs- maßnahme	Art des Untergrunds		Geometrie des Untergrunds		
	Stahl	minera- lisch	große geschlossene Fläche	filigrane Teile	kleine Flächen
Trockenstrahlen mit festem Strahlmittel	+	+	+	(+)	(+)
Feucht(Wasser)- strahlen	(+)	+	+	-	-
Flammstrahlen	+	+	+	-	-
Fräsen	-	+	+	-	-
maschinelles Schleifen und Bürsten (rotierend)	+	+	+	-	+
Dampf(Wasser)- strahlen	-	+	+	-	-
Drahtbürste per Hand	+	+	-	+	+
Schleifpapier per Hand	+	+	-	+	+
+ empfehlenswert; - nicht empfehlenswert; (+) mit Einschränkung empfehlenswert					

spachtel eingesetzt. Diesen **substanzauftragenden** Vorgang bezeichnet man als **Untergrundvorbehandlung** [58]. Bild 13 zeigt schematisch den Vorgang des Vorbehandeln und grenzt ihn anschaulich gegen das in Bild 8 dargestellte Vorbereiten ab.



**Bild 13** ■ Vorbehandeln (auftragend) zur Schaffung eines beschichtungsgerechten Untergrunds

## 2.6 Verarbeitung der Beschichtungsstoffe

Für das Aufbringen, das sogenannte Applizieren der Beschichtungsstoffe auf die Baustoffoberfläche, stehen einerseits einfache handwerkliche Geräte zur Verfügung, wie Pinsel und Rolle, und andererseits maschinenbetriebene Anlagen, wie Spritzgeräte, Gießmaschinen oder Flutgeräte. Welche Geräte mit dem größten Nutzen eingesetzt werden können, wird neben den Gerätekosten vor allem von den Umfeldbedingungen, dem Materialverlust, der Flächenleistung, der gleichmäßigen und ausreichend hohen Schichtdicke oder der Intensität der Benetzung der Haftfläche bestimmt. Auch erlauben manche Werkstoffe nur den Einsatz bestimmter Verarbeitungsgeräte.

Das älteste Werkzeug zum Beschichten ist der **Pinsel** bzw. die **Bürste**. Sie haben zwischen den Borsten eine Art Vorratsbehälter für den Beschichtungsstoff, der beim Bestreichen der Oberfläche durch Scherkräfte und Kapillarkräfte diesen an die Baustoffoberfläche abgibt. Für kleinere Flächen und für die erste Lage einer mehrlagigen Beschichtung kann der Pinselauftrag vorteilhaft sein, da die Arbeitsweise eines Pinsels eine bessere Benetzung der Baustoffoberfläche mit dem Beschichtungsstoff verspricht als z. B. der Spritz- oder Rollenauftrag. Auch werden mit dem Pinsel ungünstige Oberflächengeometrien besser erreicht. Je nach Verlaufsvermögen des Beschichtungsstoffs verbleibt an der fertigen Beschichtung ein Pinselstrichmuster (Bild 14).

Mitte des 20. Jahrhunderts wurde in den USA die sogenannte **Rolle** erfunden, welche auf einer walzenförmigen Oberfläche in einem dort aufgespannten Natur- bzw. Kunstfaserflor oder in einem offenporigen Schaumstoff eine relativ große Menge an Beschichtungsstoff speichern kann. Der Kraftaufwand beim Rollenauftrag ist – bezogen auf die Applikationsfläche – moderat (ge-



**Bild 14** ■ Beschichtungsflächen, abhängig vom Beschichtungswerkzeug;  
links: Pinselstriche, rechts: Orangenschalenstruktur

ringer als beim Pinselauftrag), da die Rolle wie ein Rad über die Baustoffoberfläche geführt wird. Für die Großflächenapplikation bietet die sogenannte ›Airlessrolle‹ mehrere Vorteile. Der Beschichtungsstoff wird nicht durch Eintauchen der Rolle, sondern über einen Schlauch von der ›Airlesspumpe‹ in den Flor der Rolle transportiert. Durch das Einsparen von Muskelkraft und Zeit kann mit diesem Verfahren bei sonst weitgehend gleichbleibendem Beschichtungsergebnis eine höhere Flächenleistung erzielt werden. Das Charakteristikum der dadurch hergestellten Beschichtung ist der Orangenschaleneffekt (Bild 14) an der Oberfläche, der durch die Art des Flors der Rolle, abhängig vom Verlaufsvermögen des Beschichtungsstoffs, geprägt wird.

Mit Spritzgeräten wird der Beschichtungsstoff aus einer Distanz von wenigen Dezimetern auf eine Baustoffoberfläche gesprüht. Bei den sogenannten **Druckluft-Spritzgeräten** transportiert ein von der Spritzdüse geformter Druckluftstrahl darin verteilte Tröpfchen des Beschichtungsstoffs auf das Objekt. Da die Baustoffoberfläche die Druckluft nicht aufnehmen kann, wird der Druckluftstrahl unmittelbar vor der zu beschichtenden Oberfläche seitlich abgelenkt. Der größte Teil der Tröpfchen gelangt dennoch auf das Objekt und bildet dort den Beschichtungsfilm. Ein kleiner, aber merklicher Anteil der Tröpfchen wird jedoch von dem abgelenkten Druckluftstrahl seitlich weggerissen. Der dadurch verursachte Spritzverlust (er kann im Freien durch Windeinwirkung noch verstärkt werden) kann zu einer unerwünschten Umfeldkontamination und zu erhöhtem Materialverlust führen.

Beim sogenannten **Airlessspritzen** wird nur der Beschichtungsstoff, und dieser mit sehr hohem hydraulischem Druck, über die Düse auf das zu beschichtende Objekt transportiert. Die Spritznebelbildung ist wegen des fehlenden Druckluftstroms deutlich geringer als beim Druckluftspritzen. Ein weiterer Vorteil des ebenfalls in den USA erfundenen Airlessverfahrens liegt in seiner größeren Flächenleistung. Daher hat sich das Airlessspritzen gegenüber dem Druckluftspritzen weitgehend durchgesetzt. Neben dem Druckluftspritzen werden beim Airlessverfahren Beschichtungsflächen mit den geringsten Oberflächenunebenheiten erzielt. Bild 15 zeigt die Großflächenanwendung des Airlessspritzverfahrens auf der Schaleninnenseite eines Naturzugkühlturns.

Bei beiden Arten des Spritzauftrages wird – falls vorhanden – Lösemittel oder Wasser vom Beschichtungsstoff an die Luft abgegeben, wenn die Stofftröpfchen von der Düse zur Baustoffoberfläche fliegen. Spritznebel und Lösemittelanteile können bei der Applikation größerer, zusammenhängender Flächen in filterbestückten, über das Objekt geführten Kabinen abgefangen werden [61]. Dadurch wird ein wesentlicher Beitrag zum Schutz des Arbeitspersonals und zur Schonung des Umfeldes geleistet (Bild 16). Dieses Verfahren ist gegenüber der Applikation aus der Arbeitsbühne – wie in Bild 15 gezeigt – aufwendiger, kostenträchtiger und unter den Vorgaben der verfügbaren Ausführungszeit nicht sicher realisierbar, weshalb es praktisch nicht mehr zum Einsatz kommt.

Genügend kleine Stückgutteile können auch getaucht werden. Beim Eintauchen in den flüssigen Beschichtungsstoff ist ein gutes Auskleiden aller Ritzen, Spalte, Löcher usw. möglich. Man benötigt zum **Tauchen** entsprechend große Behälter mit Umwälzpumpen, damit das Schutzmittel homogen bleibt. Bei diesem Verfahren muss eine relativ große Menge an Beschichtungsstoff vorgehalten werden, weshalb das Tauchen nur zum Einsatz kommt, wenn große Serien gleichartiger Teile mit dem gleichen Werkstoff zu behandeln sind.

Beim sogenannten **Fluten** wird aus einem Schlauch von mehreren Millimetern Durchmesser und endständiger Schlitz- oder Rundstrahldüse das Schutzmittel mit schwachem Druck auf die Baustoffoberfläche gelenkt. Dieser Schutzmittelstrahl wird so auf die Oberfläche geleitet, dass er als Flüssigkeitschleier der Schwerkraft folgend abläuft. Dadurch ist gewährleistet, dass die Baustoffoberfläche für eine gewisse Zeit von flüssigem Schutzmittel bedeckt ist, welches der Baustoff kapillar aufsaugen oder adhäsiv an seine Oberfläche binden kann. Das Fluten wird vor allem beim Aufbringen von hydrophobierenden Imprägniermitteln auf Fassaden angewendet. Bild 17 zeigt die Anwendung eines Siloxanprodukts auf der saugenden Betonoberfläche einer Kühlturmschale im Zusammenhang mit der Anwendung eines Oberflächenschutzsystems von Typ OS 2 nach [3].



**Bild 15** ■ Airlessspritzverfahren zur Applikation von lösemittelbasierten EP- bzw. PUR-Beschichtungsstoffen auf großen Flächen von Naturzugkühltürmen



**Bild 16** ■ Seilgeführte Airlessspritzkabine mit Absaug- und Filtervorrichtung



**Bild 17** ■ Flutanwendung von niederviskosen »wasserdünnen« Hydrophobierungsmitteln auf saugendem Beton



Bei Fußbodenflächen bietet sich wegen der horizontalen Lage das **Gießverfahren** an. Es kann manuell erfolgen, indem der Beschichtungsstoff ausgegossen und mittels Zahnkellen, Schiebern oder mit Rollen verteilt wird. Das Gießen kann auch mit sogenannten Einbaufertigern [62] erfolgen (Bild 18): Der auf dem Gießfahrzeug transportierte Beschichtungsstoff wird über Leiteinrichtungen zu einer am Heck angeordneten Zahnrakel geführt und dort verteilt. Voraussetzung für den Einsatz des Einbaufertigers ist das Vorliegen einer großen zusammenhängenden Fläche. Die im Gießverfahren zu verarbeitenden Beschichtungsstoffe müssen außerdem über besondere Verlaufeigenschaften verfügen. Bei dickschichtigem Auftrag ( $> 1\text{ mm}$ ) empfiehlt sich im unmittelbaren Nachgang eine Entlüftung mit der Stachelwalze.

Bezüglich der **Häufigkeit der Anwendung** im praktischen Bautenschutz steht der Rollenauftrag an erster Stelle, gefolgt vom Airlessspritzen und dem Pinselauftrag. Gießen, Tauchen und Fluten sind auf spezielle Objektflächen bzw. Stoffsysteme beschränkt. Hinweise zur Wahl der optimalen Applikationsmethode enthält Tabelle 4.

Abschließend zu den Anwendungs- bzw. Applikationsverfahren sei noch auf eine Definitionsentwicklung der letzten 50 Jahre hingewiesen. Als es die heute gängigsten Verfahren Rollen und Spritzen noch nicht gab, war der Pinsel bzw. die Bürste das Werkzeug der Wahl. Aus der Historie heraus hat sich dazu der Begriff des ›Anstreichens‹, meistens mit ›Ölfarben‹ entwickelt [63]. In den letzten Jahrzehnten hat sich immer mehr der Begriff des **Oberflächenschutzes** mit der Betonung auf Schutz herausgebildet. Veranlassung dazu war, dass sowohl im industriellen als auch speziell im Baubereich Anforderungen entstanden, die vorher nicht existent waren. Zugleich war es möglich, diese Anforderungen durch Neuentwicklung von synthetisch hergestellten Beschichtungsstoffen zu erfüllen.



**Bild 18** ■ Einbaufertiger, der den aufgegossenen Beschichtungsstoff über Zahnleistensegmente aufzieht

Tabelle 4 ■ Hinweise für die Wahl der Applikationsmethode

Applikations- verfahren	Flächen- Leistung	Material- verlust	Benetzung der Haftfläche	Gleichmä- ßigkeit der Schichtdicke	Schichtdicke pro Arbeitsgang
Airlessspritzen	++	-	+	++	++
Druckluftspritzen	+	--	(+)	+	+
Rollen	+	+	±	--	+
Streichen	-	+	++	-	+
Fluten	+	+	±		
Tauchen	+	+	±		
Gießen + Zahnkelle	++	+	+	+	++
++ sehr positive Bewertung; -- sehr negative Bewertung					

Es hat sich in diesem Zuge durchgesetzt, insbesondere dort, wo das Ziel des **(Bauten)Schutzes** verfolgt wird, den Vorgang und das Ergebnis mit dem Begriff Beschichtung bzw. des Beschichtens mit Beschichtungsstoffen zu verbinden. Natürlich auch dann, wenn das Ziel der Maßnahme nicht nur auf das Bauteil (Schutz), sondern gleichzeitig auch noch auf das menschliche Auge, die Sinneswahrnehmung Aussehen, Farbe etc. gerichtet ist. Gleichzeitig dazu verlieren zum Thema Oberflächenschutz Begriffe wie Anstrich, Anstreichen und Anstrichstoffe ihre Bedeutung. Man verwendet sie noch im umgangssprachlichen Bereich oder dort, wo man mit dem Ergebnis ausschließlich die Sinneswahrnehmung einer Oberflächenbeschaffenheit verfolgt.

2.7      **Verfestigung zur Beschichtung**

Beschichtungsstoffe müssen im fluiden Zustand (Flüssigkeit oder Nebel) vorliegen, weil nur in diesem das Benetzen der meist profilierten und oft porigen Baustoffoberfläche vollständig erreicht wird, sodass eine ausreichende Haftung zwischen beiden entsteht. Dazu sollte der aufgetragene Beschichtungsstoff auch ausreichend lange als kontaktierendes Fluid vorliegen, d. h. er sollte nicht zu schnell verfestigen. Der Gebrauchszustand der Beschichtung erfordert dagegen eine feste, trockene, klebfreie Oberfläche. Nach dem Auftragen des Halbfertigprodukts Beschichtungsstoff auf die Oberfläche muss also eine Umwandlung von flüssig nach fest eintreten.

Wird diese Umwandlung durch Verdunsten von Lösemittel oder Wasser erreicht, so bezeichnet man diesen Vorgang als **physikalische Trocknung**. Wird



der Übergang jedoch durch chemische Reaktion zwischen zwei verschiedenen Bindemittelkomponenten oder einer Bindemittelkomponente mit Bestandteilen der Luft oder des Untergrunds erzeugt, so spricht man von einer **chemischen Vernetzung** oder der Härtung. Da der Anwender den Mechanismus der Umwandlung nicht stets genau kennt und bei bestimmten Beschichtungsstofftypen sowohl ein physikalisches Trocknen als auch ein chemisches Erhärten parallel auftreten können, ist es zweckmäßig, den Phasenübergang mit den Begriffen **Verfestigung** oder **Verfilmung** zu beschreiben. Dies entspricht auch eher dem entstehenden Fertigprodukt Beschichtung, denn bei der beschriebenen Umwandlung von flüssig nach fest bildet sich auf der beschichteten Oberfläche eine feste, membranartige Schicht aus Polymerbindemittel bzw. aus dem Polymerbindemittel mit den darin eingebundenen, weiteren Komponenten wie Pigmente, Füllstoffe etc., die im Zuge der Verfestigung auch noch den erforderlichen Haftverbund mit dem Untergrund eingeht.

Die beiden Mechanismen, ein flüssiges Polymerbindemittel in den festen Zustand zu überführen, haben verschiedene Konsequenzen für die Eigenschaften des Beschichtungsstoffs und des Fertigproduktes Beschichtung:

- Durch **Lösen** erreicht man eine sehr homogene, molekulare Verteilung des Bindemittels in meist flüchtigen, niedermolekularen organischen LösemitteIn. Die Pigmente und Füllstoffe schwimmen in der Bindemittellösung. Der Beschichtungsstoff hat in der Regel hydrophoben Charakter, d.h. er ist mit Wasser nicht mischbar. Das bedeutet aber auch, dass er bei der Anwendung im Freien in der Filmbildungsphase einer unvorhergesehenen Regeneinwirkung recht gut standhält und meist nur an seiner Oberfläche Spuren der Regeneinwirkung verbleiben. Bei der Trocknung durch Verdunsten der LösemitteIn verschweißen die Polymermoleküle miteinander unter Einschluss der Pigmente und Füllstoffe zu einer weitgehend gleichmäßig strukturierten Schicht, wobei das Ergebnis des Endzustands von mehreren Stoff- und Umgebungsparametern abhängt [64].
- Die **dispargierten** Beschichtungsstoffe bestehen aus einer wässrigen Phase, in der das Bindemittel in Gestalt feiner Polymermolekültröpfchen verteilt vorliegt. Die Pigmente und Füllstoffe schwimmen analog zu den gelösten Beschichtungsstoffen, hier jedoch in Wasser. Eine Emulgatorhülle um jedes Polymermolekültröpfchen verhindert das Verkleben derselben untereinander sowie mit den Pigmenten und Füllstoffen in der Zeit zwischen der Produktion des Beschichtungsstoffs (Halbfertigprodukt) und der Anwendung am Objekt. Die Trocknung erfolgt durch Verdunsten des Wassers, bei porösen Baustoffen zusätzlich durch kapillares Absaugen des Wassers in den Untergrund. Dabei koaleszieren die Polymerbindemitteltröpfchen miteinander und schließen ggf. vorhandene Pigmente und Füllstoffe mit ein.

Die Geschwindigkeit des Trocknens ist auch hierbei von mehreren Stoff- und Umgebungsparametern abhängig [65]. Solange dieser Prozess nicht weitgehend abgeschlossen ist, hat dieser Beschichtungstyp bei der Anwendung im Freien im Gegensatz zu den nicht wässrigen Systemen keine ausreichende Regenfestigkeit. Bei zu früher Regenbeaufschlagung kommt es zum Abwaschen (Entfernen) des applizierten, aber noch in wässriger Phase vorliegenden Beschichtungsstoffs. Wegen der Größe der Bindemitteltröpfchen ist der entstehende Film in der Regel nicht so homogen und so lückenlos dicht wie der aus einer Lösung bzw. aus reaktiven Flüssigharzen entstandene. Verbleibende Emulgatorbestandteile verursachen die bleibend stärkere Quellbarkeit von Dispersionsbeschichtungen bei Wassereinwirkung, aber auch die bessere Diffundierbarkeit für Wassermoleküle [66].

Im Allgemeinen ist ein Beschichtungsfilm, der durch Trocknen einer Lösung oder durch chemische Erhärtung gebildet wurde, gegen diffundierende Schadstoffe und vor allem gegen Feuchte dichter und widerstandsfähiger als ein aus einer Dispersion entstandener Film. Dispersionen haben jedoch den Vorteil, dass der Träger der flüssigen Phase, das Wasser, kostengünstiger, umweltfreundlicher und beim Herstellen des Beschichtungsstoffs, beim Lagern, Transportieren und Verarbeiten unproblematischer ist. Auch können feuchte Untergründe damit etwas besser benetzt werden. Die Werkzeuge der Verarbeiter lassen sich meist besser reinigen. Dispergierte Werkstoffe ersetzen zur Schonung der Umwelt zunehmend die gelösten. Ein wesentlicher Nachteil der Dispergierung in Wasser gegenüber dem Lösen in Lösemitteln ist das langsamere Verdunsten des Wassers, insbesondere bei hohen relativen Luftfeuchten. Dieses Verhalten ist im Freien bei Feuchtwetterlagen und in der kühleren Jahreszeit störend und muss bei Planung und Einsatz diesbezüglicher Beschichtungsstoffe stets bedacht werden.

Die klimatischen Bedingungen bei der Verfestigung haben einen nicht unwesentlichen Einfluss auf die Qualität des Fertigproduktes Beschichtung. Dabei spielt sowohl der Bereich der Temperatur (zwischen 5 und 30 °C) als auch die relative Luftfeuchte (zwischen 30 und 80 % r.F.) eine wesentliche Rolle. Abhängig vom Bindemitteltyp muss der Abstand zur Taupunkttemperatur (siehe auch Kapitel 3.7.2) im Auge behalten werden. In den Technischen Merkblättern der Beschichtungsstoffe finden sich Hinweise zu den einzuhaltenden klimatischen Bedingungen und weitere Informationen, die auf die Filmbildung Einfluss nehmen.

Mag eine hohe relative Luftfeuchte bei physikalisch trocknenden wässrigen Beschichtungen sich nur verzögernd auf die Verfestigung auswirken, kann

dies bei wässrigen, chemisch vernetzenden Beschichtungsstoffen auf eine Qualitätsminderung der Beschichtung hinauslaufen.

Werden die 2K-Ausgangskomponenten eines wasserbasierten Beschichtungsstoffs bei feuchten Luftbedingungen gemischt und appliziert, könnte man geneigt sein, anzunehmen, dass die Luftfeuchte die Vernetzung nicht stört, weil das Wasser in der Luft identisch ist mit dem im Beschichtungsstoff. Mit zunehmendem Feuchtegehalt der angrenzenden Luft vermindert sich das Konzentrationsgefälle zur essenziell notwendigen Austrocknung, d. h. zum Ausdiffundieren aus dem Beschichtungsstoff in den angrenzenden Luftraum. Diese Hemmung wirkt sich kontraproduktiv auf die chemische Vernetzung der funktionellen Gruppen der Bindemittelausgangskomponenten aus, die in Gegenwart des ›Anmachwassers‹ nicht abschließend verläuft, sondern auf einem niedrigeren Level als geplant irreversibel stehen bleibt.

Befänden sich die polymeren, funktionellen Gruppen der Ausgangskomponenten in einem lösemittelbasierten System, könnten bei normal belüftetem angrenzendem Luftraum und insbesondere im Freien auch bei hoher Luftfeuchte wegen des konstant hohen Konzentrationsgefälles zwischen Beschichtungsstoff und angrenzendem Luftraum trotz feuchter Luft die Lösemittel stets planmäßig ausdiffundieren, sodass die chemische Vernetzung dadurch nicht behindert wird.

## 2.8 Alterung, Ertüchtigung, Neubeschichtung

Polymerbeschichtungen kommen in vergleichsweise geringer Schichtdicke zur Anwendung. Per Bestimmung werden sie an den Oberflächen der betreffenden Bauteile gerade dort angeordnet, wo sie als Barriere gegen verschiedenste äußere Einwirkungen erforderlich sind. Sie sind deshalb in besonderem Maß einer Beanspruchung und dem Prozess der Alterung ausgesetzt. Darunter versteht man die Gesamtheit aller im Laufe der Zeit irreversibel ablaufenden chemischen und physikalischen Vorgänge [10], die zu nachteiligen Eigenschaftsänderungen der Polymerbeschichtung führen. Ablagerungen an der Beschichtungsoberfläche, wie Anschmutzungen, Algenbildung, Pilzbildung, Bakterienschleim (siehe dazu auch Kapitel 3.3), die zwar das Aussehen verändern, nicht jedoch die Struktur der Beschichtung, zählen nicht zur Alterung der Polymerbeschichtung im vorgenannten Sinne.

Änderungen werden am stärksten durch Wärme und Feuchte bewirkt. Treten thermische und hygrische Wechselbeanspruchung auf, wirkt sich das darüber hinaus beschleunigend auf die Alterung aus. Die UV-Strahlung des Sonnenlichts wirkt in der Regel nur an der Oberfläche der Beschichtung alternd. Ty-

pische Alterungsfolgen bei Polymerbeschichtungen sind Verspröden, Glanzabfall, Farbänderungen, Mikrorisse, Kreiden, Verbundschwächung etc. [70]. Nicht unter den Begriff der Alterung fallen systemische Versagensmechanismen von Beschichtungen wie chemische Aufzehrung, Zerschlagen, Zerbröseln, Abblättern u. Ä.

Die Alterung von Polymerbeschichtungen ist aufgrund der organischen Struktur im Prinzip unvermeidbar, allerdings kann der zeitliche Ablauf – im Wesentlichen bestimmt durch die äußeren Einwirkungen, die Stoffformulierung und speziell durch den Bindemitteltyp – sehr verschieden sein und von wenigen Jahren bis zu einigen Jahrzehnten reichen.

Nur wirklich sachverständige Personen vermögen zu beurteilen, welches Ausmaß an Alterung bei einer speziellen Beschichtung am betreffenden Einsatzort nach dem Stand der Technik unvermeidbar ist. Größenordnungsmäßig lässt sich jedoch unter Zugrundelegung des heutigen Standes der Stofftechnologie die Nutzungsdauer der überwiegenden Zahl der im Bauwesen verfügbaren Polymerbeschichtungen bis zur nächsten Unterhaltungsmaßnahme (lifetime to next maintenance), auf wenigstens zehn Jahre veranschlagen, vorausgesetzt, die allgemein anerkannten Regeln des Standes der Beschichtungstechnik werden eingehalten. Im Prinzip kann man Eigenschaftsänderungen von Beschichtungen über ihr Versprödungsverhalten erfassen und bewerten bzw. messen und daraus auf deren Beständigkeitsdauer schließen. Die Messmöglichkeit bleibt jedoch auf wenige Eigenschaften beschränkt und erfordert den Einsatz anspruchsvoller Gerätschaften.

Oberflächenverwitterung und Schichtabbaustrukturen sowie versprödungsbedingte Mikrorissbildung lassen sich lichtmikroskopisch und rasterelektronenmikroskopisch darstellen. Dazu bedarf es zuvor der speziellen in-situ-Beprobung und einer labormäßigen Probenpräparation, bevor solche Untersuchungen und Bewertungen vorgenommen werden können.

Bei ordnungsgemäß aufgetragenen Beschichtungsmaterialien führen die genannten äußeren Einflüsse dazu, dass an der Beschichtung im Verlauf der Zeit zunächst eine allgemeine Schwächung des Systems eintritt, die visuell meist nicht zu erkennen ist. Das nächste Stadium ist ein ganz örtliches, visuell kaum wahrnehmbares Versagen. Wird diese partielle Verschlechterung rechtzeitig erkannt, kann eine Totalerneuerung noch umgangen werden, indem man Erhaltungsmassnahmen vornimmt. Wird in diesem Stadium jedoch nichts unternommen, weiten sich die Schwächen aus und führen schließlich zu einem totalen Versagen. Spätestens in dieser Phase nimmt auch die zu schützende Baustoffoberfläche Schaden. Dieser muss dann mit einem zusätzlichen (kostenträchtigen) Aufwand beseitigt werden [67].

Generell endet bei Bauwerken, deren Nutzungsdauer allgemein mit wenigstens 50 bis mehr als 100 Jahren veranschlagt wird, die Nutzungsphase einer Beschichtung deutlich vorher. Beschichtungen können zwar durch intervallmäßige Ertüchtigung eine beträchtliche Verlängerung ihrer Wirkungskdauer erfahren, man muss jedoch davon ausgehen, dass zur Abdeckung des gesamten Nutzungszeitraums eines Bauwerks im Einzelfall auch mal eine vollständige Erneuerung erforderlich wird (siehe auch Bild 2). Aus wirtschaftlichen Erwägungen und aus Gründen des Umweltschutzes sollte bei der Planung der Oberflächenschutzmaßnahme darauf geachtet werden, dass bei einer späteren Neubeschichtung möglichst wenig aufwendige und wenig umweltbelastende Arbeiten anfallen. Abgestimmt auf die Schwächung bzw. Schädigung der Erstbeschichtung werden eher Teilerneuerungen vorgenommen und spezielle Beschichtungsstoffe eingesetzt, die eine ausreichende Verträglichkeit mit der Erstbeschichtung haben.

Das sogenannte Monitoring, welches das Bauobjekt während seiner Nutzungszeit durch Beobachtung und Bewertung von Zustandsänderungen begleitet, versetzt den Bauherrn/Nutzer in die Lage, rechtzeitig beanspruchungsabhängig Ergänzungsmaßnahmen einzuleiten [68].

## 3 Offen zutage tretende Schäden

### 3.1 Klassifizierung der Schäden

In der Praxis des Bauwesens treten Schäden an Beschichtungen in bestimmten Formen auf. Diese werden im sprachlichen Umgang und auch im Fachschrifttum nicht einheitlich gebraucht. In Tabelle 5 sind die häufigsten Schadensformen in einer überschaubaren Klassifizierung sieben Schadensgruppen zugeordnet. Diese werden noch in die zwei Hauptgruppen visuelle und strukturelle Änderungen von Polymerbeschichtungen unterteilt. Jede Gruppe wird mit einem Großbuchstaben abgekürzt, der im direkten Zusammenhang mit dem jeweiligen Gruppennamen steht. Bei der Kurzbeschreibung der Schadensformen in Spalte 4 der Tabelle 5 sowie in den folgenden sieben Unterkapiteln des Kapitels 3 wird über diese Buchstaben Bezug auf die sieben Gruppen genommen.

**Tabelle 5** ■ Erscheinungen, Gruppen und Formen von Schäden/Mängeln

Hauptgruppen	Schadensgruppen		Schadensformen
visuelle Änderungen	Änderung der Farbe, der Helligkeit und des Glanzes	A	Vergilben, Verfärben, Verblassen, Milchigwerden, Glanzzu- oder -abnahme (matt), Aufhellen, Nachdunkeln
	Bewuchs und Ablagerungen	B	Warzen, Schleime, Sporen, Algen, Pilze, Ausbluten, Ausblühen, Ausschwitzten, Anschnitzung aus Immission
	Imperfektionen der Oberfläche	I	Poren, Stippen, Krater, Runzeln, Strich- oder Narbenstruktur
strukturelle Änderungen	Risse	R	zügig-gradlinig, gezackt, scharenartig, netzartig, sternförmig, Trennrisse, Anrisse
	Hohlraumbildung und Blasen	H	Beulen, Pusteln, Taschen, einzelne Blasen, perlenschnurartige Blasen, nesterartige Schaumstruktur
	Verbundversagen	V	Hohlliegen, Unterwandern, Aufschüsseln, Abrollen, Absplittern, Abschuppen, Abblättern
	Zersetzen nach Altern, durch Quellen, Verwittern oder Abnutzung	Z	Aufweichen, Auflösen, Klebrigwerden, Kreiden, Verspröden, Hochziehen, Auslaugen, Abreiben

Bei drei Schadensgruppen (A, B, I) wird von äußeren, visuell erkennbaren Merkmalen ausgegangen. Bei den übrigen vier Schadensgruppen (R, H, V, Z) spielt diejenige Zustandsveränderung eine Rolle, die zwar optisch erkennbar ist, die jedoch auch eine strukturelle Änderung in der Beschichtung beinhaltet. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass ein aufgetretener Schaden, von dem zunächst nichts außer seiner Erscheinungsform bekannt ist, in die Gruppenklassifizierung eingeordnet werden kann. Zu beachten ist bei diesem Klassifizierungssystem, dass einige Schadensformen in mehrere Gruppen eingeordnet werden könnten. Beispielsweise ist eine Zersetzungserscheinung, wie sie in Gruppe Z behandelt wird, auch mit einer oder mehreren der in Gruppe A zusammengefassten visuellen Veränderungen verbunden. In einer solchen Situation sollte man versuchen festzustellen, welche Erscheinung primär und welche sekundär ist. Im obigen Beispiel dürfte der Zersetzungsprozess als primär anzusehen sein. Der Schaden wäre demnach in Gruppe Z einzuordnen. Eine Einordnung dieser Art kann subjektiv sein, weil sie von der bewertenden Betrachtung abhängig ist.

Hinweise zur Bewertung von Menge und Größe und der Intensität von gleichmäßigen Veränderungen im Aussehen sind in [12] zu finden.

**Die Schadensgruppe A Änderung der Farbe, der Helligkeit und des Glanzes** umfasst visuell nachteilige Veränderungen an Beschichtungen, die eigentlich nur das ästhetische Empfinden des Betrachters, je nach dessen Sensibilität, stören. Unter ›Farbe‹ ist dabei ausschließlich der Sinneseindruck (nicht die Substanz in Form des Beschichtungsstoffs oder der Beschichtung) gemeint. Bei gleichbleibender Farbe einer Oberfläche kann eine optische Veränderung auch noch durch Helligkeits- und Glanzänderungen verursacht sein, weshalb die Schadensgruppe A in ihrer Bezeichnung alle drei Begriffe enthält. Eine gewisse Problematik besteht darin, dass eine eindeutige Unterscheidung von Farbe, Helligkeit und Glanz nur über die Farbmessung und deren Messverfahren möglich ist.

**Die Schadensgruppe B Bewuchs und Ablagerungen** fasst solche Veränderungen auf der Beschichtungsoberfläche zusammen, die dort generiert oder aus Immissionen deponiert werden. D. h. es liegen entweder – meist dünnsschichtig – von Lebewesen erzeugte Beläge (z. B. Algen, Pilze, Bakterien Schleime) oder solche aus toter Materie vor (z. B. Ausblühsalze, Anschmutzungen durch Stäube). Bezüglich der Zugehörigkeit von Belägen zur Schadensgruppe B ist es ohne Belang, ob die Substanz aus dem Untergrund, aus der Beschichtung oder aus dem an die Beschichtung angrenzenden Medium (z. B. Luft, Wasser) stammt, bzw. ob die Substanz sich erst auf der Beschichtungsoberfläche, z. B. durch eine chemische, physikalische oder biologische Reaktion, gebildet hat. Mit dem Belag ist in aller Regel ein verändertes Aussehen der Beschich-

tung verbunden. Der Schaden könnte somit auch in die Gruppe A oder die Gruppe I eingeordnet werden. Unter dem Stereomikroskop kann der Bewuchs bzw. die Ablagerung jedoch eindeutig identifiziert werden.

In die Schadensgruppe I **Imperfektionen der Oberfläche** fallen bereits im Material vorhandene oder aufgrund von Verarbeitungsproblemen entstandene, nicht geplante Erscheinungen, welche die Oberflächengestalt der Beschichtung nachteilig darstellen. Meist handelt es sich um den Übergang zwischen einer relativ glatten und ebenen Oberfläche (schadenfreier Bereich) in lokal strukturierte bzw. aufgeraute Oberflächenbereiche.

In die Gruppe R **Risse** fallen schwerwiegende Schäden, weil durch Risse einerseits die Schutzwirkung einer Beschichtung örtlich aufgehoben wird. Wenn diese Risse deckungsgleich mit Rissen im Untergrund verlaufen, wird das nachteilige Merkmal noch weiter verschärft. Andererseits sind Risse in der Beschichtung Ausgang für weitere Schadensformen, z. B. für das Ablösen und Aufschüsseln der Beschichtung. Grundsätzlich sind zwei Erscheinungsformen für die Beurteilung von Bedeutung: einerseits der Verlauf und das strukturelle Bild der Risse, andererseits die Tiefe des Risses in der Beschichtung.

Die Schadensgruppe H **Hohlraumbildung und Blasen** enthält Schadensformen, die sich als Hohlräume zwischen Beschichtung und Untergrund, aber auch innerhalb der Beschichtung bzw. zwischen den Einzellagen eines Beschichtungssystems bilden. Dabei kann es sich um Hohlräume handeln, die ohne Überdruck entstanden sind. Häufig bilden sich jedoch Hohlräume durch einen gleichmäßigen, inneren Überdruck, wie er nur durch Gase oder Flüssigkeiten, nicht aber durch Festkörper erzeugt werden kann. Es entstehen dann membranartig begrenzte Hohlräume, die man als Blasen bezeichnet. Die sogenannten osmotisch generierten Blasen haben für die Beschichtungstechnik eine ganz besondere Bedeutung. Sie treten vielfältig auf und können als eine beschichtungsspezifische Schadensform bezeichnet werden. Sie treten nach der Filmbildung auf, wenn neben bestimmten Parametern aus der Nutzung genügend Feuchte (Wasser) zugegen ist.

In ihrer Erscheinungsform ähnlich, jedoch durch gänzlich andere Mechanismen entstehen Blasen in situ, d. h. im Übergangsstadium vom Beschichtungsstoff zur Beschichtung (Stichwort: Sättigungsfeuchte, Kapitel 3.6.3).

Die in der Schadensgruppe V **Verbundversagen** zusammengestellten strukturellen Änderungen stellen eine dramatische Konsequenz einer Schädigung dar, denn ohne Verbund verliert die Beschichtung ihre Wirkung. Bei der Beurteilung verschiedener Formen von Ablöseerscheinungen kommt es vor allem auf die Größe der sich ablösenden Teile, auf die Beschaffenheit und auf die



Lage der Trennfläche an, wie z.B. zwischen Untergrund und Beschichtung oder zwischen den Einzellagen des Beschichtungssystems.

Auch in der Schadensgruppe **Z Zersetzen nach Altern, durch Quellen, Verwittern oder Abnutzung**, werden Schadensformen zusammengefasst, die tief greifende Änderungen an der Substanz der Beschichtung darstellen. Meist handelt es sich um physikalisch-chemische Vorgänge, die entweder das Beschichtungssystem als Ganzes oder eine der Einzellagen betreffen. Man könnte die in dieser Gruppe zusammengefassten Erscheinungen als eine Folge von Korrosionserscheinungen bezeichnen. Im Gegensatz zur Metallkorrosion, die nur an der Oberfläche stattfindet, laufen die hier zu besprechenden Erscheinungen unter Umständen auch im Inneren der Beschichtung, sozusagen an jeder Stelle, ab. Da ein chemisch oder mechanisch bedingter Substanzverlust vorliegen kann, und weil meist ein stufenloser Übergang zwischen diesen beiden Ursachen besteht, kann man auch das nutzungsbedingte Versagen der Beschichtung, z.B. durch Abrieb oder durch eine wiederkehrende chemische Beanspruchung, ebenfalls der Gruppe **Z** zuordnen.

Man muss sich darüber im Klaren sein, dass das Schadhafwerden von Polymerbeschichtungen einem Ablauf mit wechselnden Erscheinungsformen unterliegt. In der Regel verschlimmert sich der Zustand mit der Zunahme der destruktiven Wirkung des Beschichtungsabbaus. Anhand einer Korrosionsschutzbeschichtung auf Stahl soll dies durch die meist hintereinander laufenden Stufen veranschaulicht werden:

Glanzverlust  
↓  
Kreiden  
↓  
Risse, Rostpusteln  
↓  
Ablösen

Deshalb kann es auch vorkommen, dass zwei Beobachter, die das gleiche Objekt zu verschiedenen Zeitpunkten untersuchen, zu unterschiedlichen Feststellungen gelangen, sofern die Untersuchungstermine nur genügend weit auseinander liegen.

## 3.2 Farb-, Helligkeits- und Glanzänderungen (A)

### 3.2.1 Allgemeine Aspekte

Bei der Ermittlung der Ursache von Farb-, Helligkeits- und Glanzänderungen [11] muss grundsätzlich auseinandergehalten werden, ob die Änderung die Oberfläche der Beschichtung selbst betrifft oder ob es sich vielleicht um einen Belag auf der Oberfläche handelt (siehe Kapitel 3.3). Welche der beiden Möglichkeiten in einem gegebenen Fall vorliegt, lässt sich oft durch vorsichtiges Abschaben oder Ablösen einzelner Schichten oder aber durch mikroskopische Betrachtung des Querschnitts an entnommenen Proben feststellen.

Es sollte auch möglichst genau zwischen Farbe, Helligkeit und Glanz unterschieden werden. Dabei muss man jedoch wissen, dass vor allem Helligkeitsänderungen, aber auch Glanzänderungen unlösbar mit der Farbbeurteilung des menschlichen Auges verbunden sind. Helligkeitsunterschiede müssen daher immer im Zusammenhang mit Farbänderungen gesehen werden. Bei farbmessenden Untersuchungen wird die Helligkeit von Körperfarben mit dem Hellbezugswert beurteilt, die Farbe mit der betreffenden Wellenlänge [89].

### 3.2.2 Farb- und Helligkeitsänderungen

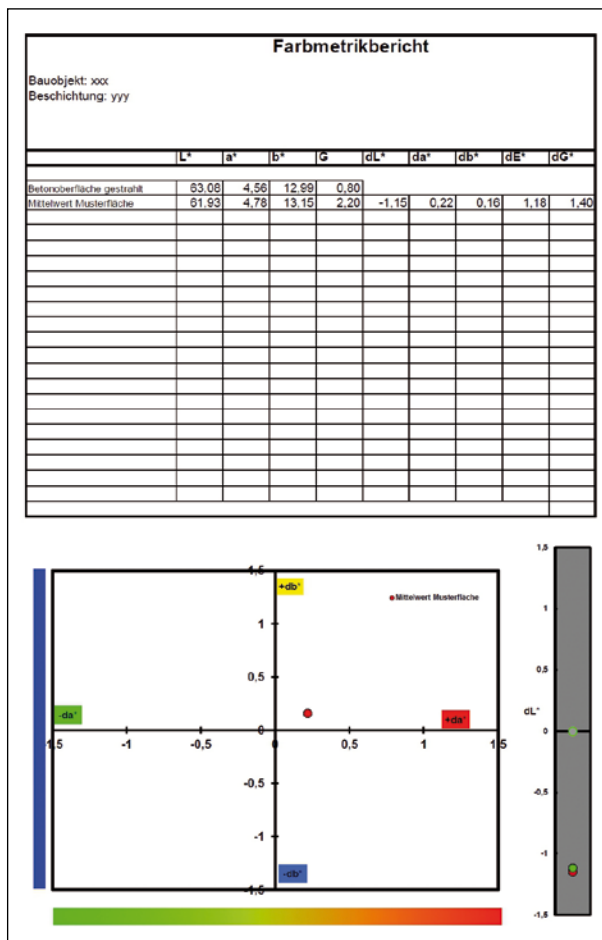
Wenn Änderungen der Farbe beurteilt werden müssen, ist natürlich eine Referenzgröße – auch Buntton [11] genannt – erforderlich, die den vereinbarten ursprünglichen Zustand definiert. Hierzu kann z. B. auf eine Sammlung von Farbmustern [13] und auf den Graumaßstab [17] zurückgegriffen werden, die darüber hinaus auch noch nach Sättigung und Helligkeit definiert sind.

Moderne Messsysteme erlauben es, nebeneinander Farbe mit Helligkeit [16] und Glanz einer Beschichtungsfläche auch im mobilen Einsatz zu bestimmen [69]. Dabei wird mittels eines Spektralfotometers das Spektrum des sichtbaren Lichts in monochromatische Lichtbänder zerlegt. Über ein Fotoelement werden im Zweistrahlverfahren die von der Probe und vom Referenzstandard reflektierten Lichtmengen ermittelt, ausgewertet und nach dem CIELab-Farbraum-System dreidimensional auf den Achsen Helligkeit (L), grün-rot (a), blau-gelb (b) dargestellt. Gleichzeitig wird der Glanzgrad unter dem 60°-Winkel gemessen.

Bild 19 zeigt die Referenzfläche eines Großbauwerks in einem beigen Farbton. In Bild 20 ist der spektralfotometrisch gemessene und nach dem CIELab-Farbraum-System ausgewertete Farbton zusammen mit der Helligkeit farbmessend dargestellt. Diese Darstellung gilt als messtechnische Referenz für Folgeuntersuchungen zur Identifikation und wiederkehrenden Verifizierung



**Bild 19** ■ Referenzfläche einer vereinbarten Beschichtung mit vereinbartem Sonderfarbton



**Bild 20** ■ Dreidimensionale Darstellung des Farbeindrucks der Referenzfläche gemäß Bild 19 im CIELab-Farbraum-System

des gleichbleibenden Farbtons bei Verwendung nacheinander gefertigter Produktionschargen des vereinbarten Beschichtungsstoffs.

Farb- und Helligkeitsänderungen bei **transparent** beschichteten Untergründen können im Wesentlichen drei verschiedene Gründe haben:

- a) Wird eine völlig transparente und farblose Beschichtung appliziert, kann gegenüber dem unbeschichteten Untergrund eine Farbveränderung (z. B. in Richtung Gelb) bzw. eine Helligkeitsänderung (meist eine Abdunklung) eintreten. Diese Änderung beruht auf der Benetzung des Substrates durch den transparenten Beschichtungsfilm. Man spricht dann auch von der Anfeuerung des Untergrunds.
- b) Man kann eine Farbänderung der transparenten Beschichtung selbst empfinden, wenn z. B. einwirkendes Licht oder die Temperatur eine stoffliche Änderung an den Bindemittelmolekülen hervorgerufen hat. Auch hierbei tritt in der Regel eine Farbänderung in Richtung Gelb ein.
- c) Eine Farb- oder Helligkeitsänderung eines farblos beschichteten Untergrunds kann aber auch eintreten, wenn bei gleichbleibender Beschaffenheit der Beschichtung eine stoffliche Änderung des Untergrunds hervorgerufen wird. Dies wird z. B. an klarlackierten Hölzern durch das Licht bewirkt, wenn es die farblose Beschichtung durchdringt und die Holzoberfläche chemisch/biologisch verfärbt.

Diese drei unterschiedlichen Komponenten können durch Überlagerung zum Gesamteindruck führen.

Die in das nahezu farblose Bindemittel eingebetteten Pigmente sind die eigentlichen Träger der Farberscheinung einer Beschichtung. Somit haben Veränderungen an den Pigmenten stets auch Farbveränderungen an der Beschichtung zur Folge. In der Regel enthält eine Beschichtung ein Pigmentgemisch, dessen einzelne Pigmente durchaus unterschiedliche Beständigkeit gegen chemische und witterungsbedingte Einflüsse haben. Äußere Einflüsse können leichte – wenn nur ein Teil des Pigmentgemisches angegriffen wurde – bis extreme – wenn ein massiver Angriff auf ein oder mehrere Pigmente erfolgt ist – Farbänderungen auslösen.

Bei langfristiger oder intensiver Einwirkung der Globalstrahlung ist insbesondere mit der Zerstörung gewisser organischer Pigmente zu rechnen. Gegen Licht in der Regel beständiger sind die anorganischen Pigmente. Auch die Beständigkeit der Pigmente gegen Säuren ist insbesondere wegen saurer Atmosphären zu berücksichtigen. Die Beständigkeit gegen Basen ist bei der Beschichtung von kalk- und zementgebundenen Baustoffen zu beachten. In den Tabellen 6 bzw. 7 sind Bindemittel, Pigmente und Lösemittel hinsichtlich

**Tabelle 6** ■ Zusammenstellung von Beschichtungsbestandteilen mit weitgehender Säurebeständigkeit

Bindemittel	Pigmente, Füllstoffe	Lösemittel, Verdünner
Chlorkautschuk	Titandioxid	Aliphaten
Cyclokautschuk	Chromoxid	Benzine
Polyvinylchlorid	Bariumsulfat	Aromaten
Polyvinylidenchlorid	Siliciumdioxid	Toluol
chlorsulfoniertes Polyäthylen	Eisenoxide, gegläht	Xylol
Polychloropren	Nickeltitangelb	Ketone
Bitumen	Phthalocyanin	Aceton
ungesättigte Polyester	Chromphthalat	MEK
Polyurethan	Talkum	(Relevant sind nur in der Beschichtung verbliebene Anteile!)
	Calciumsilikate	
	Ruß	
	Graphit	

**Tabelle 7** ■ Zusammenstellung von alkaliempfindlichen Beschichtungsbestandteilen (Empfindlichkeit nimmt von oben nach unten ab)

Bindemittel, Weichmacher	Pigmente, Füllstoffe	Lösemittel, Verdünner
Esterweichmacher	Aluminiumpulver	Alkohole
■ Phthalsäure-Ester	Zinkchromat	Ester
■ Adipinsäure-Ester	Bleichromat	■ Essigsäure-Ester
trocknende Öle	Molybdätröt	■ Phthalsäure-Ester
■ Leinöl	Eisencyanblau	■ Phosphorsäure-Ester
■ Sojaöl	Zinkstaub	■ Glykolderivate
■ Ricinenöl	Zinkoxid	(Relevant sind nur in der Beschichtung verbliebene Anteile!)
■ Holzöl	Azopigmente	
Alkydharze		
ungesättigte Polyesterharze		
Polyvinylacetat		
Polyurethane auf Esterbasis		
Polyvinylpropionat		
Epoxidester		

ihrer Beständigkeit bzw. Empfindlichkeit im sauren bzw. basischen Milieu zusammengestellt.

Die **Vergilbung** tritt meist nur bei bestimmten organischen Bindemitteln (z. B. mit aromatischen Molekülgruppenstrukturen oder bestimmten Doppelbindungssequenzen) auf und ist als ein erstes Anzeichen von Alterungsvorgängen anzusehen. Bei der Beurteilung des Vergilbens ist eine Unterscheidung nach der Ursache zweckmäßig: Die **Dunkelgilbung** [70] an lichtgeschützten Orten ist für trocknende Öle und ungesättigte Polyester typisch, während

die **Lichtgilbung** durch Lichteinwirkung in exponierter Lage z. B. bei aromatischen Isocyanaten, Leinölalkyd und Epoxidharzen bevorzugt auftritt. Insbesondere bei Ölen und oxydativ trocknenden Alkyden führt die Wärmeeinwirkung zu einer besonders ausgeprägten Gilbung. Eine Vergilbung ist meist nur bei hellen Farben von Bedeutung, denn bei dunklen Farben wird sie nicht bzw. nur kaum wahrgenommen.

Bei Holzlackierungen ist die Farbänderung einer transparenten Beschichtung, d. h. der Oberflächenschutzschicht gegenüber den Farbänderungen des Holzes im Sinne von Mechanismus c) deutlich geringer.

Eine Vergilbung kann auch durch eine fehlerhafte Anwendung von Beschichtungsstoffen verursacht sein. Bild 21 zeigt einen Ausschnitt der kreisrunden Stützenreihe eines Naturzugkühlturms. Dort musste eine rissüberbrückende Beschichtung appliziert werden. Man hat sich funktional begründet für eine Polyurea-Beschichtung entschieden (siehe Kapitel 2.3). Aus der Einrüstung zur Zugänglichkeit ergaben sich übereinander drei Arbeitsbereiche. Im oberen und im unteren Arbeitsbereich stellte sich der planmäßige Farbton (RAL7032) ein. Im mittleren Bereich lag dieser Farbton zunächst auch vor. Nach einigen Wochen setzte sich dieser mittlere Bereich durch eine Vergilbung von den Restflächen der Stützen ab.

Planmäßig werden die Ausgangskomponenten A (Isocyanat) und B (Amin) in qualitativ konfektionierten Gebinden zur Baustelle geliefert, gemischt und appliziert. Im vorliegenden Fall ist für einen Mittenbereichsabschnitt eine geringere als die fertig konfektionierte Gebindemenge erforderlich geworden. Man hat diese Menge durch ›Wiegen‹ und Mischen der Ausgangskomponenten unter Baustellenbedingungen disproportional, d. h. nicht im exakten

**Bild 21** ■ Rissüberbrückende Polyurea-Beschichtung auf Kühlturm-Schalenzstützen; vergilbte Beschichtungsgebiete, auf denen der Beschichtungsstoff mit disproportional angesetzten Ausgangskomponenten zum Einsatz gebracht wurde



Mischungsverhältnis angesetzt. Zunächst stellte sich auf der gesamten Stützhöhe einheitlich der Farbton ein. Weil jedoch in der fertigen Beschichtung überschüssige funktionelle Molekülgruppen verblieben waren, haben diese unter Lichteinwirkung relativ rasch eine chemische Änderung vollzogen, was sich als Farbänderung in Richtung Gelb äußerte. Eine weitere Folge dieser Applikationsfehleistung ist in der Regel die Minderung weiterer Leistungsmerkmale wie Rissüberbrückungsfähigkeit, Dauerhaftigkeit etc.

Eine an Westfassaden (Wetterseite) anzutreffende Verfärbung auf transparent lackiertem Holz ist die **Blaufärbung** durch den sogenannten Bläuepilz. Der Befall durch diesen Pilz kann durch **Bläueschutzmittel** verhindert werden. Der Bläuepilz lebt vom Zellinhalt des Holzes und greift die Zellwände praktisch nicht an, weshalb gebläutes Holz in seinen Festigkeitseigenschaften nicht geschädigt zu sein braucht. Während die Bläue vor allem an beregneten Westfassaden wegen der dort höheren Befeuchtung bevorzugt auftritt, ist an den nach anderen Himmelsrichtungen orientierten Fassadenflächen die dort übliche **Grau- oder Silberfärbung** ungeschützt der Witterung ausgesetzten Holzes auf den Bewuchs mit einem grauen Schimmelpilz zurückzuführen.

Das sogenannte **Weißanlaufen** beruht in der Regel darauf, dass über die Änderung der Brechungsindices unpigmentierter Beschichtungsstoffe, aber auch im Bindemittel von pigmentierten Beschichtungsstoffen – und dort an den Oberflächen – eine weißliche Trübung auftritt, d. h. Licht wird diffus gestreut. Förderlich für das Weißanlaufen sind in Beschichtungsstoffen enthaltene hydrophile Lösemittel, wenn diese in einem frühen Stadium (quasi flüssiger Zustand) einer übermäßigen Luftfeuchte ausgesetzt sind. Auch eine sehr rasche Verdunstung der Lösemittel bei der Trocknung, die im Zuge des verdunstungsbedingten Abkühlens eine Wasserdampfkondensation auf der Beschichtung hervorruft, kann zum Weißanlaufen führen.

Zu einem Milchigwerden der Oberfläche kann es auch dann kommen, wenn z. B. amingehärtete Epoxide in der Phase der Vernetzung einer zu hohen Feuchtklimabeanspruchung ausgesetzt sind. Neben der Einlagerung von Wasser mit dem oben beschriebenen Ergebnis der Änderung des Berechnungsindex kann das in der Luft enthaltene Kohlendioxid mit Unterstützung des an der Oberfläche adsorptiv angelagerten Wasserfilms mit dem Amin der Bindemittelmischung zu einer Carbonat- bzw. einer Carbamatschicht reagieren, mit der Folge der weißlichen Trübung. Bild 22 zeigt eine unter diesen Umständen entstandene weißliche Trübung. Dort ist an einem Nachmittag im September eine lösemittelhaltige 2K-Epoxidbeschichtung im Airlesssspritzverfahren auf die Schaleninnenseite eines Naturzugkühlturms appliziert worden. Die relative Luftfeuchte lag unterhalb 28 %. In der Nacht fiel die Temperatur



**Bild 22** ■ Amingehärtete Epoxidbeschichtung erlitt weißliche Trübung, weil in statu nascendi zu geringe Temperatur und zu hohe Luftfeuchte herrschten; dadurch Wassereinlagerung in das Bindemittel der Oberflächenzone mit irreversibler, diffuser Streuung des auftreffenden Lichts



und gleichzeitig stieg die relative Luftfeuchte an. Am anderen Tag war die Beschichtung auf den vertikalen Spritzapplikationsstreifen weißlich getrübt.

Der Kühlturm ist in diesem Zustand in Betrieb gegangen. Nach einer fünfjährigen Betriebsphase ist eine Statusüberprüfung vorgenommen worden. Es wurde festgestellt, dass die weißliche Trübung weitgehend verschwunden war. Eine signifikante Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit der Beschichtung war nicht erkennbar. Noch stärker kann diese weißliche Trübung ausfallen, wenn die Beschichtung im quasi flüssigen Zustand mit Regenwasser beaufschlagt wird.

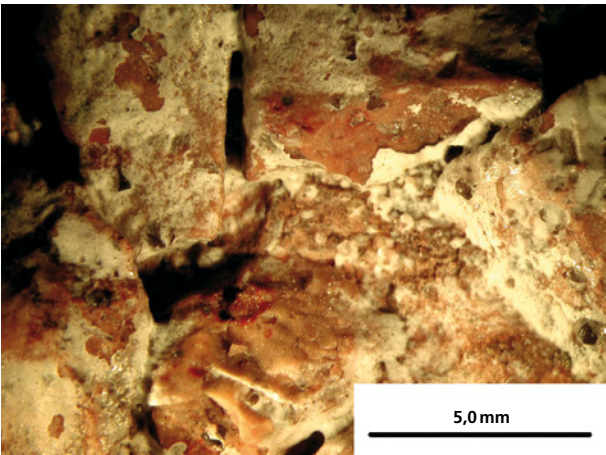
Zur weißlichen Trübung kann es auch an planmäßig verfilmten Polymerbeschichtungen im Zuge des Alterungsprozesses kommen, wenn sich z. B. durch Lufteinlagerung eine Phasentrennung zwischen dem Polymerbindemittel einerseits und dem nicht färbenden Füllstoffgemisch andererseits einstellt. Auch dadurch wird der Brechungsindex für das sichtbare Licht so stark verändert, dass in der ehemals farblosen Beschichtung eine diffuse Lichtstreuung (totale Reflexion der zu weiß aufaddierten Spektralfarben des sichtbaren Lichts) auftritt, die als Weißanlaufen empfunden wird. Eine chemische Änderung des Polymerbindemittels muss damit nicht verbunden sein. Die Entstehung dieses Typs der weißlichen Trübung wird durch die Bilder 23 und 24 veranschaulicht. Die weißliche Trübung war dort am intensivsten, wo die Schichtdicke der ehemals farblosen Beschichtung am größten war (Arbeitsabschnitte, Läuferbildung etc.).

In Tabelle 8 wird ein Überblick über die bei pigmentierten Beschichtungen häufigsten Farb- und Hell-/Dunkeländerungen gegeben und deren Ursache genannt.





**Bild 23** ■ Farblos mit gelöstem Acrylat (+ Stellmittel) beschichtete Südfassade aus eingefärbten Waschbeton-Fertigelementen; nach mehreren Jahren örtlich weißliche Trübungen



**Bild 24** ■ Stereomikroskopaufnahme zeigt im Detail Bild 23, wobei farblose Acrylatschicht mit zunehmender Dicke weißlich getrübt ist

**Tabelle 8** ■ Farb- und Hell-/Dunkeländerungen bei Beschichtungen und deren mögliche Ursachen

<b>Schwärzung</b>	Durchschlagen eines bituminösen Untergrundes, Pilzbewuchs
<b>Vergrauung</b>	Verschmutzung klebriger oder feuchter Oberflächen, Pilzbewuchs, schwärzende Einflüsse in geringer Intensität
<b>Aufhellen</b>	Zersetzen organischer Pigmente unter Lichteinwirkung; Zersetzen von Polymerbindemitteln; Bildung von Kreidungsprodukten; Änderung des Brechungsindex durch physikalische und chemische Vorgänge
<b>Rotfärbung</b>	Rotalgenbewuchs unter Wasser

Fortsetzung auf S. 61 ➔

Tabelle 8 ■ Fortsetzung

Vergrünung	Bewuchs durch Algen und Moose, Gilbung eines blaupigmentierten Polymeres
Braunfärbung	Anwesenheit von Eisenoxidpigment in wetterbeanspruchten Polymeren; durchschlagende Eisenkorrosionsprodukte, Verwitterungsprodukte bituminöser Bindemittel
Vergilbung	Bindemittelialterung, Hitzeeinwirkung, Ausschwitzen von Inhaltsstoffen des Untergrundes oder der Beschichtung; Disproportionale (fehlerhafte) Mischung von 2 K-Beschichtungsstoffen

3.2.3 Glanzänderungen

Glanz ist wie Farbe ein Sinneseindruck. Das Glanzvermögen einer Oberfläche als Funktion des von der Oberfläche reflektierten Lichts kann gemessen und als Reflektometerwert dargestellt werden [14]. Auf einfachere Weise wird z. B. der Glanzgrad von Kunststoffdispersionen [15], abhängig vom Beobachtungswinkel, nach fünf Stufen beurteilt. Die Glanzgradstufen basieren auf Reflektometermessungen und sind in Tabelle 9 dargestellt.

Das Glanzvermögen der Beschichtungs Oberfläche wird per Rezeptur am einfachsten über die kritische Pigmentvolumen-Konzentration (PVK) eingestellt, wobei die Erhöhung Glanzminderung und die Absenkung Glanzerhöhung zur Folge hat [50]. Weil dadurch ggf. die Leistungsmerkmale der Beschichtung beeinträchtigt werden und dieser Weg bei unpigmentierten Beschichtungen nicht beschritten werden kann, wird die Glanzeinstellung in der Regel über sogenannte Mattierungsmittel vorgenommen.

In diesem Zusammenhang kann der Fall eintreten, dass nach Applikation des Beschichtungsstoffs von Anfang an ein geringeres Glanzvermögen vorliegt, als es ursprünglich zu erwarten war. Dann stellt sich die Frage, ob die

Tabelle 9 ■ Bestimmung des Glanzgrades von Beschichtungen

Glanzgrad	Beobachtungswinkel (gegen das Lot)	Reflektometerwert [14]
glänzend	60 °	> 60
mittlerer Glanz	60 °	> 60
mittlerer Glanz	85 °	> 10
matt	85 °	< 10
stumpfmatt	85 °	< 5

Beschichtung der vertraglich festgelegten Beschaffenheitsvereinbarung entspricht, mit allen damit zusammenhängenden sonstigen Leistungsmerkmalen.

In Bild 25 ist der Ausschnitt einer beschichteten Stahlbetonschale eines Kühlturms gezeigt, die im Betrieb der Anlage mit einem Gemisch aus Kühleistungsschwaden ( $\text{H}_2\text{O}$ ) und Abgas ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ) beaufschlagt wird. Die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit sind sehr hoch. Deshalb ist zu klären, ob die Fertigungscharge b (matt) in ihrem Leistungsvermögen mit dem Leistungsvermögen der Fertigungscharge a (glänzend) vergleichbar ist.

Glanzänderungen bei Beschichtungen sind insbesondere dort von Interesse, wo ein hoher Glanz möglichst lange erhalten bleiben soll. Witterung, chemische Angriffe, mechanische und thermische Beanspruchung führen bei Polymerbeschichtungen im Laufe der Zeit generell zu matten Oberflächen. Hochglänzende Oberflächen bleiben bei vielen Beschichtungen deshalb nur für eine gewisse, oft aber ausreichend lange Zeit erhalten.

Das Mattwerden einer Oberfläche ist die optische Folge einer Aufrauung, wobei die Tiefen und Breiten der Täler und Berge des Rauprofils in der Regel so klein sind, dass sie nur noch im Rasterelektronenmikroskop sichtbar gemacht werden können. Die Aufrauung ist wiederum eine Folge der witterungsbedingten Zersetzung und Erosion der Oberfläche. Bei Beschichtungen geht mit diesen Vorgängen häufig das Kreiden einher. Es wird in Kapitel 3.8.3 näher beschrieben.

Für jede Art von Beschichtung mit gegebenem Bindemittel und feststehender Pigmentierung verläuft die **Glanzabnahme** im Laufe der Zeit unter der entsprechenden Witterungseinwirkung im Prinzip in gleicher Weise: Anfänglich



**Bild 25** ■ Deutlich unterschiedliches Glanzvermögen von zwei Fertigungschargen unmittelbar nach der Anwendung des gleichnamigen Produktes

verändert sich der Glanz relativ wenig, was bedeutet, dass zunächst eine bestimmte Energiedosis auf die Beschichtung einwirken muss, bevor Materialveränderungen auftreten. Die Länge der für erste merkbare Glanzänderungen erforderlichen Zeit ist ein wesentliches Qualitätsmerkmal von Polymerbeschichtungen, wenn sie als Hochglanzlackierungen angewendet werden sollen.

An die geschilderte Inkubationszeit schließt sich eine Zeitspanne an, in welcher der Glanz deutlich und relativ gleichmäßig abnimmt. Dabei bildet sich allmählich ein Rautiefenprofil mit einem quasistationären Zustand aus. Der Glanz hat dann einen bestimmten Endwert angenommen. In den Sommermonaten ist der Glanzabfall stärker als in den Wintermonaten, was sich mit der längeren Sonneneinstrahlung in den Sommermonaten erklären lässt.

Die **Glanzerhöhung** als entgegengesetzte Erscheinung des Mattwerdens ist relativ selten, kann aber als Folge des Migrierens (Ausschwitzens) nicht oder schlecht mit dem Bindemittel verträglicher Weichmacher auftreten. Die Beschichtungsoberfläche wird dann auch klebrig und neigt zur Verschmutzung. Auch das Austreten von überschüssigen Härteranteilen aus zweikomponentigen Beschichtungsstoffen kann zur Glanzzunahme führen. Ebenso kann bei plastomeren Bindemitteln (z.B. PVC) eine Glanzerhöhung durch Wärmeinwirkung erreicht werden, sofern dadurch nachträglich eine verbesserte Verfilmung erzielt wird.

Die Glanzhaltung einer Polymerbeschichtung wird sehr wesentlich von der Rezeptierung der Beschichtung bestimmt: Bestimmte Bindemittel verlieren sehr schnell ihren anfänglichen Glanz, andere Bindemittel besitzen ein sehr gutes Glanzhaltevermögen. Ein gutes Glanzhaltevermögen läuft meist weitgehend parallel mit hoher Alterungsresistenz, hohem Vernetzungsgrad und dem Fehlen polarer Molekülstrukturen im Bindemittel. Für eine Beschichtung mit guter Glanzhaltung sind nicht nur ein geeignetes Bindemittel, sondern auch eine geeignete Pigmentierung, ein geringerer Füllstoffgehalt und eine optimale Filmbildung erforderlich. Das Glanzvermögen bleibt umso länger erhalten, je schwächer die einwirkende Beanspruchung ist. Besonders ungünstig ist ein Klima, in dem länger anhaltende Sonnenstrahlung mit hoher Luftfeuchte gepaart ist (z.B. Tropenklima), während im gemäßigten Klima durch den dort oft bedeckten Himmel und durch Schmutzablagerungen eine beschichtete Oberfläche relativ lange hochglänzend bleiben kann.

## 3.3 Belegung der Beschichtungsoberfläche (B)

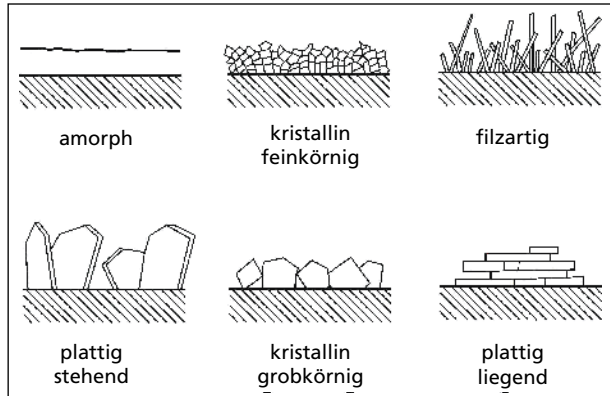
### 3.3.1 Ablagerungen

Als Ablagerungen werden sowohl organische als auch anorganische, meist dünnsschichtige Beläge bezeichnet, welche die Beschichtung zumindest örtlich bedecken und damit eine neue Oberfläche mit anderer Struktur, wie dies Bild 26 zeigt, neuer Farbe, anderer Helligkeit oder verändertem Glanz schaffen. Oft bilden sich Ablagerungen ungleichmäßig aus und erfassen nur Teilbereiche. Manche Ablagerungen bilden regelmäßige oder unregelmäßige Muster.

Die hier behandelten Ablagerungen lassen sich meist eindeutig von den in Kapitel 3.2 beschriebenen Farb-, Helligkeits- und Glanzänderungen einer Beschichtung abgrenzen. Wenn dies mit bloßem Auge nicht gelingt, ist es doch durch Licht- oder Rasterelektronenmikroskopie recht gut möglich. Ablagerungen sind definitionsgemäß **artfremde Substanzen**, die sich durch mechanische Bearbeitung mit Wasser, Lösemittel, Säuren oder Basen meist entfernen lassen.

Typische Beispiele für Ablagerungen auf Fassadenbeschichtungen sind **Vergrauungen** durch Anschmutzung aus Staubimmissionen. Die Intensität ist von mehreren Parametern abhängig. Einerseits spielt die Menge der imitierenden Stäube, TSP (Total Suspended Particulates)-Konzentration genannt, eine wesentliche Rolle [71]. Andererseits wird die Anhaftung von Stäuben durch den Feuchtehaushalt einer Beschichtung beeinflusst [72]. An Beschichtungen, die hygroskopisch wirken, Wasser aufnehmen, dabei quellen und das Wasser längere Zeit zurückhalten, findet eine deutlich stärkere Schmutzanbindung statt als an wasserabweisenden, eher hydrophoben Beschichtungen. Ist eine Fassade abgestuft schlagregenexponiert, kann es zu nennenswert unterschiedlicher Anschmutzung kommen, wenn örtlich der Schlagregen staubabwaschend wirkt, während der Staub im »Regenschatten« an der Fassadenfläche verbleibt. Ein markantes Beispiel dafür zeigt Bild 27. Dort ist der Turmbereich relativ sauber, weil er durch die Beregnung, unterstützt vom Wind, gewaschen wird, während dieser Wascheffekt an der Fassade der unteren Geschosse, quasi in der Straßenschlucht, deutlich vermindert ist, sodass eine stärkere Anschmutzung erfolgt.

**Korrosionsprodukte, Ausblühsalze und Sinterbeläge** des Untergrunds können an Fehlstellen durch eine Beschichtung hindurchwandern und lagern sich dann auf deren Oberfläche ab. Rostpusteln sind der typische Fall des Aufwachsens von Eisenoxiden an Fehlstellen von Korrosionsschutzbeschichtungen. Auf Beschichtungen auf zementgebundenen Baustoffen (Putz, Beton)



**Bild 26** ■ Strukturen von Belägen auf Beschichtungen



**Bild 27** ■ Fassade, die im Turmbereich durch Regeneinwirkung sauber gehalten wird, während sie im unteren Bereich im »Regenschatten« eine deutliche Anschmutzung erfährt



findet man gelegentlich Ausblühungen, meist aus Gipskristallen. Wenn Kalk herausgelöst wird, bilden sich Kalksinterbeläge, die, wie Bild 28 zeigt, zuweilen bizarre Formen annehmen können.

Das sogenannte **Durchbluten** von löslichen Bestandteilen aus einem Untergrund durch eine frisch aufgebrachte, noch lösemittelhaltige Beschichtung an deren Oberfläche wird z. B. auf bitumenhaltigen Untergründen beobachtet. Aber auch Holzinhaltsstoffe, insbesondere gewisser tropischer Hölzer, in Kunststoffen enthaltene Trennmittel oder in Betonteilen enthaltene Entschalungshilfsmittel können durch bereits verfestigte Polymerbeschichtungen migrieren und an deren Oberfläche als Belag in Erscheinung treten. Im Beton enthaltene lösliche Salze können durch Beregnungsbefeuchtung an die Oberfläche bluten und dort versintern, wie Bild 29 für den beschichteten Bereich des Betonsockels unterhalb der Fensterbank zeigt. Im benachbarten Bereich unterhalb des Mauerwerks trat diese Erscheinung nicht auf, weil das saugende Mauerwerk das Regenwasser »abgefangen« hat.



**Bild 28** ■ Kalksinterablagung auf der Wandbeschichtung als Folge eines Abdichtungsfehlers und eines daraus resultierenden HerauslöSENS von Kalk  $\text{Ca(OH)}_2$  aus einem Zementestrich, der nach Zutritt von Luftkohlen-säure  $\text{CO}_2$  zu Kalkstein  $\text{CaCO}_3$  versintert

Im weitesten Sinne können auch die oft mit krimineller Energie um sich greifenden Graffiti-Bemalungen (Schmierereien), wie sie in Bild 30 gezeigt sind, als Ablagerungen bezeichnet werden. Auch sie stellen – wenngleich mutwillig herbeigeführt – Schäden an Polymerbeschichtungen dar. Es gibt Ansätze, dem Problem zu begegnen, z. B. durch Aufbringen von Opferbeschichtungen, die dann zusammen mit den »Kunstwerken« ganz oder partiell entfernt werden können, oder durch Antigraffiti-Zusätze in die Beschichtungsstoffe [73], welche die Entfernung begrenzt erleichtern. In beiden Fällen wird die Entfernbarkeit mit zunehmender Rauheit der beschichteten Oberfläche erschwert.

Begünstigt wird der Abtrag der Graffiti-Bemalung, wenn sie möglichst kurzfristig nach ihrer Entstehung entdeckt und sofort entfernt wird [74]. Bei der Entfernung werden die klassischen Methoden angewendet, wie sie auch unter Kapitel 2.5 beschrieben worden sind. Diese sind meist radikal und nehmen oft zu viel Substanz des Untergrunds mit, sodass man ohne Neubeschichtung nicht weiterkommt.

**Bild 29** ■ Lösliche Anteile sind flächig (mit Regenwasserunterstützung) aus dem Beton durch die Beschichtung migriert und zu glattem Belag (säurelöslich) versintert.



**Bild 30** ■ Mutwillig herbeigeführte »Ablagerungen« in Form von Graffiti-Bemalungen





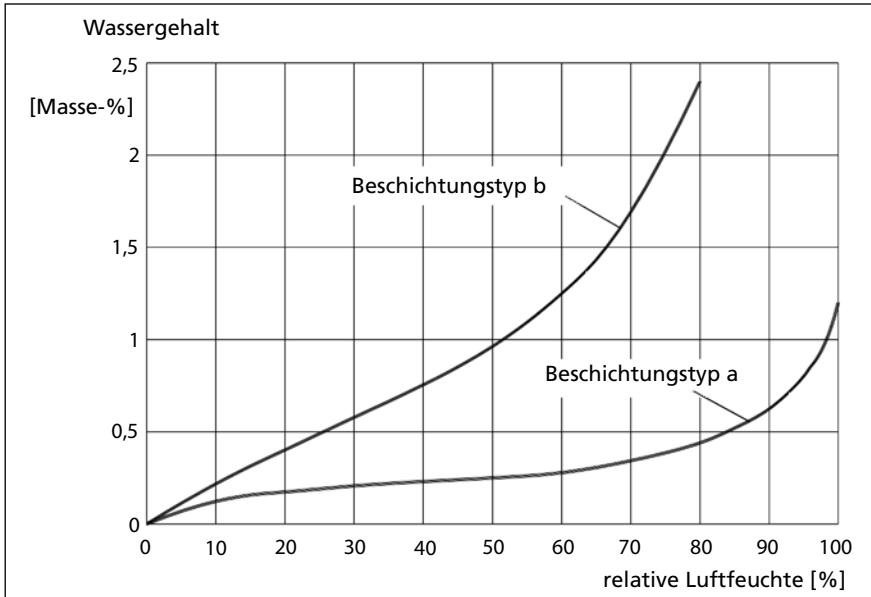
Als **Graffiti-Schutz** gegen Wiederholungstäter werden gestaffelt permanent wirkende Schutzsysteme angeboten, die dann über Wartungsverträge im Ereignisfall ertüchtigt werden.

### 3.3.2 Organischer Bewuchs

Bakterien, Algen, Pilze und Flechten, man fasst sie auch unter dem Begriff Mikroorganismen zusammen, können sich unter bestimmten Bedingungen in Form von Belägen auf Polymerbeschichtungen ansiedeln. Damit ist in erster Linie eine optische Beeinträchtigung verbunden. Mikroorganismen können jedoch auch biologisch oder mechanisch zerstörend auf Polymerbeschichtungen wirken. Lacktechnologisch kann der Hersteller von Beschichtungsstoffen einem organischen Bewuchs durch eine zweckmäßige Formulierung (Bindemittel- und Pigmentwahl) und durch biozide Wirkstoffzusätze entgegenwirken. Die Möglichkeiten, selektiv wirkende Bakterizide, Algizide oder Fungizide einzusetzen, werden allerdings durch gesetzliche Auflagen, z. B. durch die Biozid-Richtlinie [18], stringent reguliert, weil diese allzu oft auch physiologisch bedenklich für den Menschen sind.

Alle Mikroorganismen benötigen für ihr Wachstum neben anderem Wasser. Aus diesen Gründen begegnet man der Problematik am besten dadurch, dass man dort, wo feuchte Bedingungen unvermeidbar sind, nicht solche Beschichtungen einsetzt, deren Bindemittel einen Nährboden z. B. für das Pilzwachstum bildet. In jedem Fall, insbesondere auch, wenn Mikroorganismen ihre Nahrung aus der Luft, z. B. in Form von  $\text{CO}_2$ , aufnehmen, sollten dann nur solche Beschichtungsstoffe zum Einsatz kommen, deren Feuchtehaushalt niedrig ist, d. h. aufgrund ihrer internen Hydrophobie kaum Wasser aufnehmen und dieses nur in geringem Umfang adsorptiv anlagern. Dies gilt insbesondere für wässrig formulierte Beschichtungsstoffe. Die Sorptionsisotherme einer Polymerbeschichtung [111] ist hierfür ein brauchbares Maß zur Beurteilung eher geeigneter Beschichtungen. In Bild 31 sind zwei Sorptionsisothermen dargestellt, die diesbezüglich ein günstiges bzw. ein ungünstiges Verhalten darstellen.

Bakterien bzw. Bakterien Schleim findet man nur dort, wo besonders feuchte, d. h. nasse Verhältnisse vorliegen. Daher kann es auf der Oberfläche von luftberührten Polymerbeschichtungen nur in besonders feuchten Räumen, wo Oberflächen mit einem dünnen Wasserfilm belegt sind, zum Bakterienbefall kommen, jedoch viel weniger auf bewitterten Flächen im Freien. Besonders günstige Lebensbedingungen finden Bakterien auf Polymerbeschichtungen, die bestimmungsgemäß unter Wasser eingesetzt werden. In Trinkwasserbehältern ist nach der Innenbeschichtung mit Epoxidharzen ein merklicher Anstieg der Keimzahl des Wassers festgestellt worden [75]. Bild 32 zeigt



**Bild 31** ■ Sorptionsisothermen [112] als Maß für den Bewuchs durch Mikroorganismen; Beschichtungstyp a: intern hydrophobierte Beschichtung (wenig anfällig), Beschichtungstyp b: normale Kunststoffdispersion, wässrig basiert (anfällig)

**Bild 32** ■ Bakterien-schleimbildung auf einer Epoxidbeschichtung in einem Wasserbehälter



das strukturelle Oberflächenmuster einer Bakterien-schleimbildung auf der Epoxidbeschichtung eines Wasserbehälters. Erscheinungen dieser Art traten aber auch in Trinkwasserbehältern auf [76], die mit mineralisch gebundenen, starren Dichtungsschlämmen [19] ausgekleidet worden sind. Die Ursachen dieses Bewuchses, aber auch die Frage nach dem Nährboden dieser mikro-

biologischen Beläge, sind nicht vollständig geklärt. Sie können aber sofort zum Verschwinden gebracht werden, wenn das Wasser chloriert oder ozoniert wird.

Pilze brauchen neben feuchten Umgebungsbedingungen immer auch einen Nährboden, denn sie können sich nicht, wie etwa die Algen, aus  $\text{CO}_2$  aus der Luft generieren. Man bezeichnet sie deshalb auch als Schmarotzer. In den gemäßigten Klimagebieten Mitteleuropas treten sie nur unter Sonderbedingungen auf, z. B. in Brauereien, Nahrungsmittelbetrieben oder Badeanstalten. Häufig findet man sie auch an Wärmebrücken von Gebäuden auf Wandinnenseiten, also dort, wo sie auf beschichteten oder unbeschichteten Flächen als Folge eines für sie günstigen Feuchtehaushalts günstige Wachstumsbedingungen vorfinden. Der organische Bindemittelanteil von Kunststoffdispersionsbeschichtung bereitet ihnen darüber hinaus einen entsprechenden Nährboden. Bild 33 zeigt den Außenwand-Eckbereich eines Schlafzimmers. Ablagerungen aus Bewuchs dieser Art (vorzugweise Pilze) haben ein schwarzes bis graues Aussehen. Der Bewuchs verbreitet bei entsprechender Ausprägung



**Bild 33** ■ Pilzbelag (sogenannte Stockflecken) auf feuchten Oberflächen von Außenwandinnenseiten als Folge einer Wärmebrückenwirkung; Betauung im Eckbereich ist durch hohe Baufeuchte nach Bauwerkserstellung und durch ungünstiges Wohnverhalten (Heizung/Lüftung) im Schlafzimmer begünstigt worden

einen Modergeruch, wie er auch für Kellerräume typisch ist. Er wird in Wohnräumen als physiologisch bedenklich eingestuft.

Da Pilze im basischen Bereich oberhalb pH 8,5 nicht wachsen, wird feuchter Zementputz bzw. feuchter Beton, sofern er nicht carbonatisiert ist, nicht befallen. Beschichtungen auf Holz sind deshalb besonders gefährdet, weil Pilze über Fehlstellen in der Beschichtung meist reichlich Nahrung im Holzuntergrund zur Verfügung steht.

**Algen** benötigen zum Wachstum nur wenige Mineralstoffe, CO<sub>2</sub> aus der Luft, Wasser sowie Licht. In unserem gemäßigten Klima wachsen Algen nur an besonders feuchten Plätzen, z. B. an beschatteten, aber beregneten Nordwestfassaden, in Bädern, Kellern und natürlich unter Wasser. Bild 34 zeigt eine beschichtete Nordwestfassade, an welcher der Einfluss der Feuchte auf die Algenbildung studiert werden kann. Förderlich wirkt sich dort die Tatsache aus, dass eine Kunststoffdispersionsbeschichtung Verwendung fand, die über ein ausgeprägtes Wasserrückhaltevermögen verfügt (siehe auch Bild 31). Als nachteilig erkennt man aus Bild 34, dass konstruktive Details, wie zu gerin-

**Bild 34** ■ Partielle Ver-  
 algung der Beschich-  
 tung einer Nordwest-  
 fassade, abhängig vom  
 Auftreffen des Regen-  
 wassers, verbunden mit  
 der Wasseraufnahme  
 und dem Wasserrückhalte-  
 vermögen des Beschich-  
 tungstyps:  
 – unterhalb des Dach-  
 überstands und unterhalb  
 der Fensterbänke keine  
 Beregnung, deshalb kein  
 Algenbewuchs,  
 – Vertikalzone zwischen  
 den Fenstern Regen-  
 beaufschlagung, deshalb  
 Veralgung



ger Dachüberstand und Fensterbänke, das ungleichmäßige Algenbewuchsbild begünstigt haben.

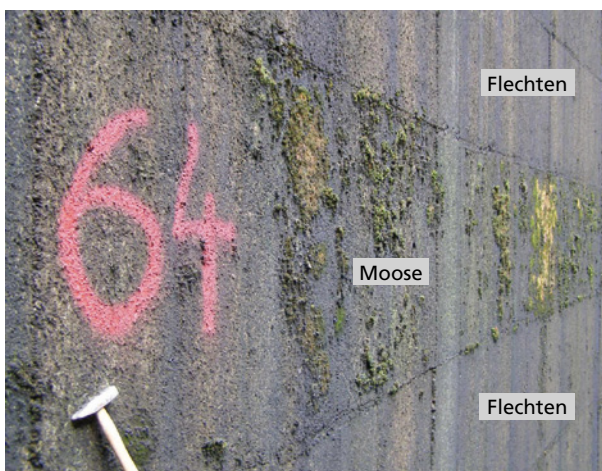
Nachdem es zunehmend schwieriger wird, Fassadenbeschichtungen mit effektiven Wirkstoffen gegen Algenbildung auszustatten [18], kommt den intern hydrophobierten Fassadenbeschichtungen, z. B. den sogenannten Siliconharzfarben, eine immer größere Bedeutung zu, wenngleich sich das Problem dadurch insgesamt nicht lösen lässt.

**Flechten** sind Lebensgemeinschaften aus Pilzen und Algen. Sie überstehen Trockenperioden sehr gut, ebenso wie Hitze und Kälte. Da Flechten nur sehr langsam wachsen, findet man sie vorzugsweise auf älteren Gebäuden, z. B. auf Dächern bzw. auf alten Anstrichen.

Eine ideale Ansiedlung von Flechten findet man in **Wasserbauwerken** außerhalb der permanenten Wasserberührung. Ganz besonders prädestiniert sind dabei Schaleninnenseiten von Stahlbetonkühltürmen, deren Randzone carbonatisiert, d. h. nur ganz schwach basisch ist, und die mit 25 bis 30° warmen Kühlleistungsschwaden beaufschlagt werden.

Zunächst bildet sich im Wege der Fotosynthese ein (grüner) Algenbelag. Diesen nutzen luftgetragene Pilzsporen als Nahrungsgrundlage zur Ansiedlung, und in einem weiteren Schritt entstehen dann natürliche Symbiosen aus Algen und Pilzen, die man dann als Flechten bezeichnet.

Bild 35 zeigt den Ausschnitt einer Schaleninnenseite, auf der sich als Folge des warmen Feuchtehaushalts und weiterer günstiger Bedingungen Algen, Pilze, Flechten und Moose gebildet haben.



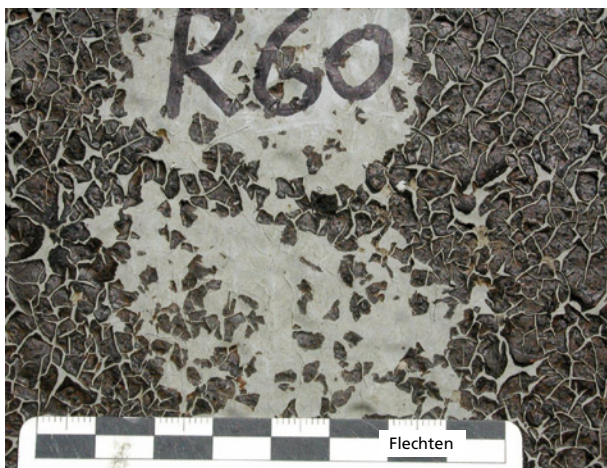
**Bild 35** ■ Innenseite eines Naturzugkühlturms im Normalbetrieb; Oberflächenbelag einer symbiotischen Generierung von Flechten aus Algen und Pilzen mit grau-brauner Beschaffenheit; örtlich wegen Optimierung durch Betonporen, Wasserspeicherung und Lichteinwirkung Weiterentwicklung zur Moosbildung



Bild 36 zeigt den Ausschnitt einer mit Epoxid beschichteten Schaleninnenseite eines Kühlturms. Das ausgeprägte Mikrorissnetz könnte eine Folge der Nährbodenausbeutung durch die Pilzbesiedlung mit nachfolgender Versprödung und Schrumpfrissbildung sein.

Wasserbauwerke werden an ihren Oberflächen durch die permanente Meer- oder Süßwasserberührung meist recht schnell mit einem relativ dicken und dichten Belag niederer Organismen überzogen. Es bilden sich Seepocken, Algen, Schnecken und Bohrwürmer sowie gelegentlich Röhrenwürmer in unregelmäßiger Dicke und Rauheit. Diese Erscheinungen werden als **Fouling** bezeichnet. Bislang hat man versucht, dem Bewuchs mit sogenannten Antifouling-Beschichtungen zu begegnen. Wegen der stringenten Regulierung des Einsatzes wirksamer Biozide [18] wird auch hier die Bekämpfung des Bewuchses immer schwieriger.

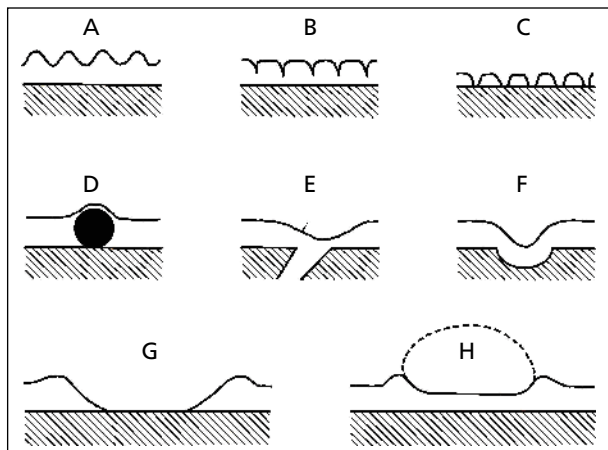
**Bild 36** ■ Schaleninnenseite eines Naturzugkühlturms im Normalbetrieb; Oberfläche ist mit Epoxidbeschichtung versehen; nach Inbetriebnahme intensiver mikrobiologischer Bewuchs (Algen, Pilze); Entstehung ungewöhnlich ausgeprägter Netzzrisse in der Beschichtung; wahrscheinlich Nährstoffausbeutung (Amin) mit der Folge der Bindemittelzehrung und Versprödung der Epoxidbeschichtung



### 3.4 Imperfektionen der Beschichtungsoberfläche (I)

Man spricht von Imperfektionen der Oberflächengestalt einer Polymerbeschichtung, wenn relativ fein strukturierte Unebenheiten vorliegen, deren typische Erscheinung eine Ausdehnung entsprechend der Größenordnung der Dicke der Beschichtung hat. Die in diesem Zusammenhang häufig auftretenden Feinstrukturen sind in Bild 37 schematisch wiedergegeben.

Als Erscheinung A ist eine weitgehend gleichmäßige wellenförmige Oberfläche gezeigt. Sie tritt gelegentlich an einzelnen Teilflächen auf und stört so die Gleichmäßigkeit der Oberfläche. Das mit dieser Gestalt verbundene



**Bild 37** ■ Imperfektionen der Oberflächengestalt von Beschichtungen

**Runzeln** ist die Folge der Vergrößerung einer Oberflächenzone und kann nur auftreten, solange diese Zone und vor allem die darunter liegende Zone relativ weich sind. Beim Runzeln entstehen keine Hohlräume. Am bekanntesten ist die Runzelung, die sich als Folge von zu dick applizierten Einzellagen von Beschichtungsstoffen auf Basis von oxydativ verfestigenden Ölen bzw. Alkyden einstellt. Die oxydative Verfestigung verläuft in einer solchen Schicht von der Oberfläche zum Untergrund hin, weil der aus der Luft stammende Sauerstoff diesen Richtungsverlauf nimmt. Es bildet sich dabei vermehrt eine verfestigte Oberflächenhaut auf einer noch weichen Zone des darunter liegenden Teils der Gesamtschicht. Teile des noch weichen Grundmaterials migrieren in die partiell verfestigte Deckschicht ein, quellen diese und bewirken eine Vergrößerung der Fläche. Die dadurch entstehende Ausdehnung parallel zur Oberfläche führt zur Auffaltung, die man als Runzelung bezeichnet.

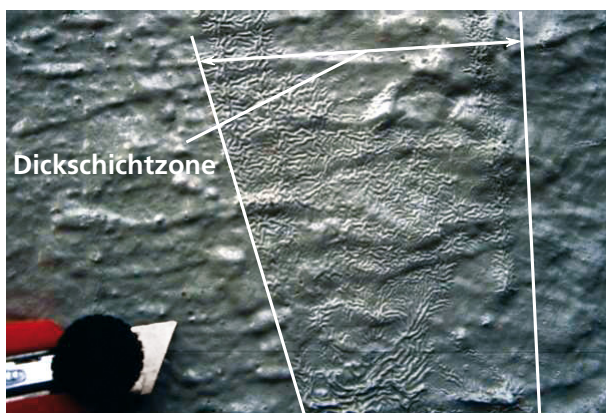
Erscheinungen dieser Art treten unter bestimmten klimatischen Umgebungsbedingungen, aber auch bei chemisch vernetzenden, lösemittelhaltigen Beschichtungen auf, wenn Quelleffekte die bereits physikalisch getrocknete und partiell chemisch vernetzte Oberflächenzone zur Runzelbildung verwerfen. Bild 38 zeigt eine auf diese Weise in einer lösemittelhaltigen 2 K-Epoxidbeschichtung entstandene Runzelung.

Die als Erscheinung B dargestellte **Verschorfung** einer Beschichtungs Oberfläche weist in der Draufsicht relativ regelmäßige Einzelfelder mit ungefähr gleichen Seitenlängen auf. Die Ursache der Verschorfung sind einerseits Benetzungsstörungen bei der Filmbildung, die durch Alterungsvorgänge zur stärkeren Ausbildung gelangen. Verhärtung und Schwinden in der Oberflächenzone können zum Einreißen führen. Die Grundstruktur der Erscheinung B kann andererseits aus den sogenannten Benard'schen Zellen entstehen. Abhängig

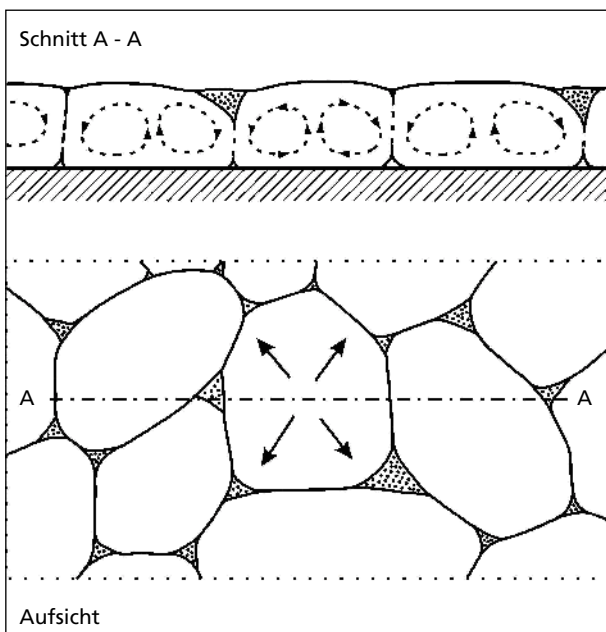
von der Oberflächenspannung des Beschichtungsstoffs bilden sich im Zuge der Vernetzung bzw. der physikalischen Trocknung oftmals Zellströmungen aus, die nach dem in Bild 39 dargestellten Mechanismus ablaufen. Voraussetzung dafür sind eine niedrige Viskosität, wenig Füllstoffe sowie Dichteunterschiede im flüssigen Beschichtungsstoff.

Bild 40 zeigt eine so entstandene Einzelfeldstruktur einer Polyurea-Beschichtung nach einer dreimonatigen Labor-Kurzbewitterung. Man erkennt ein Verschorfungsprofil mit relativ flacher Ausprägung. Durch Alterung und Abwit-

**Bild 38** ■ Erscheinung A  
– Auf der Dickschichtzone einer lösemittelbasierten 2 K-Epoxidbeschichtung bildete sich eine oberflächennahe Verfestigung. Diese verwarf sich über der länger weich gebliebenen unteren Zone wegen deren Quellwirkung zur Runzelung.



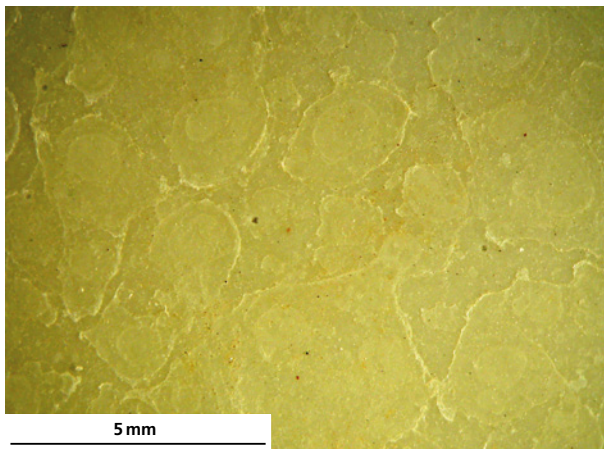
**Bild 39** ■ Erscheinung B  
– Darstellung des Mechanismus der Zellströmungen in Benard'schen Zellen; dadurch entstehen wabenartige Oberflächenstrukturen mit flachem, genarbtem Profil



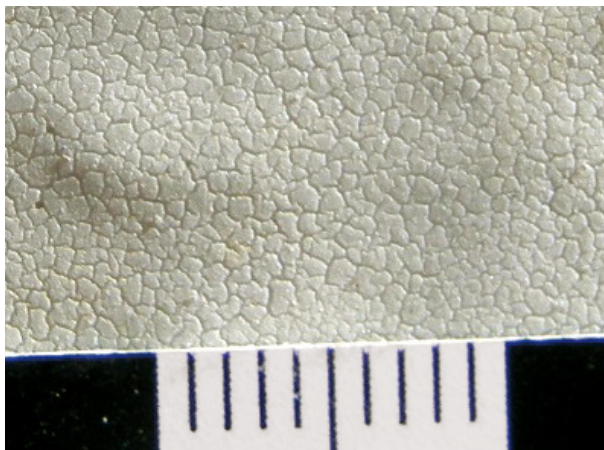


terung kann eine Verschorfungsstruktur, wie sie als Erscheinung B gezeigt ist, in die Form der Erscheinung C übergehen. Bild 41 zeigt den Übergang der nach dreimonatiger Kurzbewitterung erkennbaren Einzelfeldstruktur (B) in eine Verschorfungsstruktur (C) nach 14-monatiger in-situ-Freibewitterung.

Verschorfungsstrukturen können auch applikationstechnisch entstehen. Wenn z. B. unter thermisch ungünstigen Bedingungen bei zu niedrigen Werksstoff-, Luft- und Objekttemperaturen Beschichtungsstoffe im Airlessverfahren und dann auch noch in zu geringen Auftragsmengen pro Flächeneinheit appliziert werden, passiert es leicht, dass keine vollflächige Benetzung erzielt wird und die aufgespritzte Beschichtungsstoffmenge wegen der temperaturbedingten Steifigkeit keinen ausreichenden Verlauf hat. Das Ergebnis ist eine schorfartige Oberfläche, wie sie Bild 42 zeigt.



**Bild 40** ■ Erscheinung B  
– Einzelfeldstrukturen in einer Polyurea-Beschichtung nach dreimonatiger Kurzbewitterung bei Globalstrahlungseinwirkung und alternierender Beregnung



**Bild 41** ■ Erscheinung B  
→ C – Übergang der Einzelfeldstrukturen in einer Polyurea-Beschichtung (Bild 40) nach 14-monatiger Freibewitterung am Bauobjekt in eine ausgeprägte Verschorfung mit Verkleinerung der Einzelfeldstrukturen

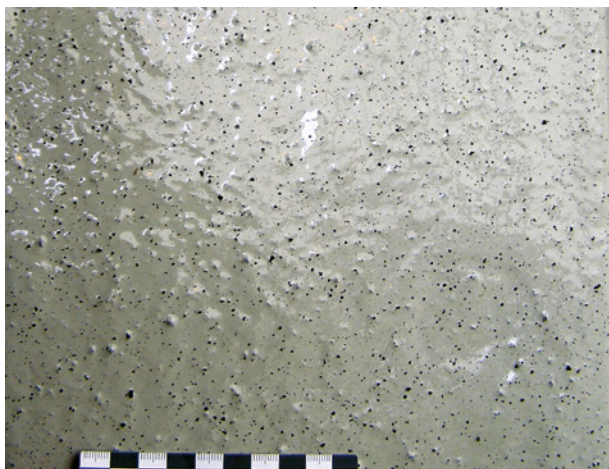
**Fremdkörper** oder **Agglomerate** können Erscheinungen entsprechend Buchstabe D hervorrufen. Zum einen können in unmittelbarer Nähe des zu beschichtenden Bauteils befindliche Sandkörner etc. windgetragen in die frische Beschichtung gelangen. Die dabei entstehenden Imperfektionen sind in Bild 43 dargestellt. Abgesehen von dem nachteiligen Aussehen und der höheren Verschmutzungsneigung wird durch die »eingebaute« Kornstruktur das planmäßig vorgesehene Rissüberbrückungsvermögen verringert.

Zum anderen können Pigmente und Füllstoffe aufgrund von Rezeptierungsfehlern Agglomerate bilden. Diese haben in gleicher Weise eine optisch nachteilige Wirkung und führen aufgrund der dadurch abgeänderten Oberflächenstruktur praktisch stets zu einer Beeinträchtigung – und der damit verursachten vor allem Schwach- und Fehlstellen der vorgesehenen Schutzwirkung.

**Bild 42** ■ Erscheinung C  
– zu geringer Materialauftrag beim Airlesspritzen und zu geringes Verlaufsvermögen wegen zu niedriger Temperatur verursacht schorartige Beschichtungsstruktur



**Bild 43** ■ Erscheinung D  
– windgetragen in die noch nicht verfestigte PUR-Beschichtung tief in den Schichtquerschnitt eingedrungene Granulartikel; die rissüberbrückende Wirkung der Beschichtung ist dadurch signifikant geschwächt



Ohne Beeinträchtigung der Schutzwirkung, aber in gleichem Maße optisch störend, wirkt sich der sogenannte Overspray aus. Dabei gelangen Spritznebeltröpfchen aus der Airlessapplikation auf bereits verfilmte Beschichtungsbereiche. Diese verlaufen nicht, sondern bleiben in Form von kleinen Halbkugeln stehen. Bild 44 zeigt diese Oberflächenstörung, die man auch der Erscheinung D zuordnet. Sie haben zwar Ähnlichkeit mit den Hohlraum-bildungen (siehe Kapitel 3.6), dürfen jedoch nicht der Gruppe der Bläschen zugeordnet werden.

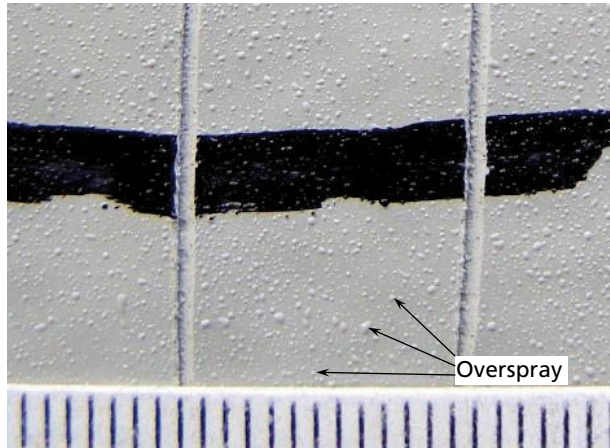
Im Sinne einer Überschussanwendung können auch Abläufer von Beschichtungsstoffen der Erscheinung D zugeordnet werden. Bild 45 zeigt eine im Bautenschutzanwendungsbereich allzu oft auftretende handwerkliche Verfehlung dergestalt, dass örtlich die Standfestigkeit des Beschichtungsstoffs überschreitende Mengen pro Flächeneinheit aufgetragen und dann nicht fachgerecht verteilt werden. Der eigentliche Nachteil liegt meist nicht in einer technischen Beeinträchtigung, sondern im damit verbundenen Imageverlust des Ausführungsunternehmens.

Die Erscheinungen E und F zeigen örtliche **Vertiefungen** in einer Beschichtung, die auf das ›Absacken‹ des flüssigen Beschichtungsstoffs nach der Applikation respektive im frühen Stadium der Trocknung oder der chemischen Vernetzung in Hohlräumen (Poren, Risse etc.) des Untergrunds zurückgehen. Erscheinungen dieser Art werden vermieden, wenn dem Beschichten eine entsprechende Untergrundvorbehandlung (siehe Kapitel 2.5) vorausgeht. Bild 46 zeigt exemplarisch die Erscheinung E in Form der eingefallenen Beschichtung am Riss im Untergrund.

Näherungsweise kreisrunde Vertiefungen mit dem Profil des Vertikalschnitts entsprechend Erscheinung G bezeichnet man als **Krater**. Oberflächenimperfectionen dieser Art entstehen z. B. durch Benetzungsstörungen beim Beschichten wegen örtlicher Unterschiede in der Oberflächenspannung: Aus dem Kraterzentrum wird der flüssige Beschichtungsstoff infolge der dort herrschenden, kleineren Oberflächenspannung verdrängt, sodass dort eine sehr viel geringere, oft sogar eine auf Null auslaufende Schichtdicke entsteht. Bekannt ist die kraterverursachende Wirkung von siliciumorganischen Substanzen, die als Verunreinigungen auf der zu beschichtenden Bauteilfläche in nicht sichtbarer Form vorliegen. Bereits homöopathische Mengen reichen aus, um Erscheinungen zu erzwingen, wie sie in Bild 47 abgebildet sind.

Eine Erscheinung gemäß Buchstabe G kann jedoch auch dadurch entstehen, dass eine Beschichtung mit plastomeren Verformungsanteilen durch eine punktförmig einwirkende, mechanische Beanspruchung irreversibel geprägt wird. Bild 48 zeigt eine Bodenbeschichtung im Detail, die einer solchen punktförmigen Belastung ausgesetzt worden ist.

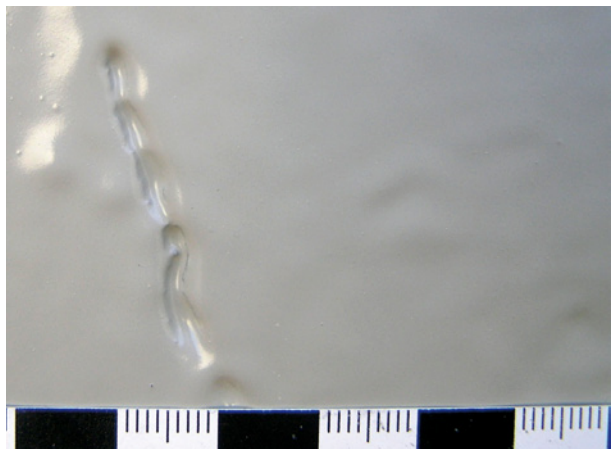
**Bild 44** ■ Erscheinung D  
 – Overspray-Partikel, die windgetragen aus der Airlessapplikation eines benachbarten Arbeitsabschnitts auf die bereits verfestigte Beschichtung gelangen; praktisch ausschließlich optische Beeinträchtigung



**Bild 45** ■ Erscheinung D  
 – durch Rollenapplikation im Überlappungsbereich zum bestehenden Ansatz verursachte Überschichtdicke und dadurch Überschreitung der Standfestigkeit mit der Folge der Bildung von Abläuferrinnen; optische Beeinträchtigung signifikant, technische Beeinträchtigung gering, wenn Total-Solid-Rezeptur vorliegt



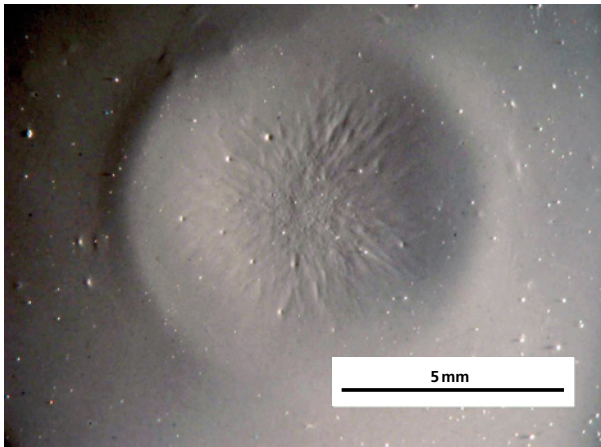
**Bild 46** ■ Erscheinung E  
 – Vertiefung, weil vorhandener Riss im Beton nicht egalisiert worden ist; Beschichtungsstoff ist am Spalt eingefallen; optische Beeinträchtigung signifikant, technische Beeinträchtigung virulent, weil im Querschnitt örtlich eine Schichtdickenschwäche vorliegt







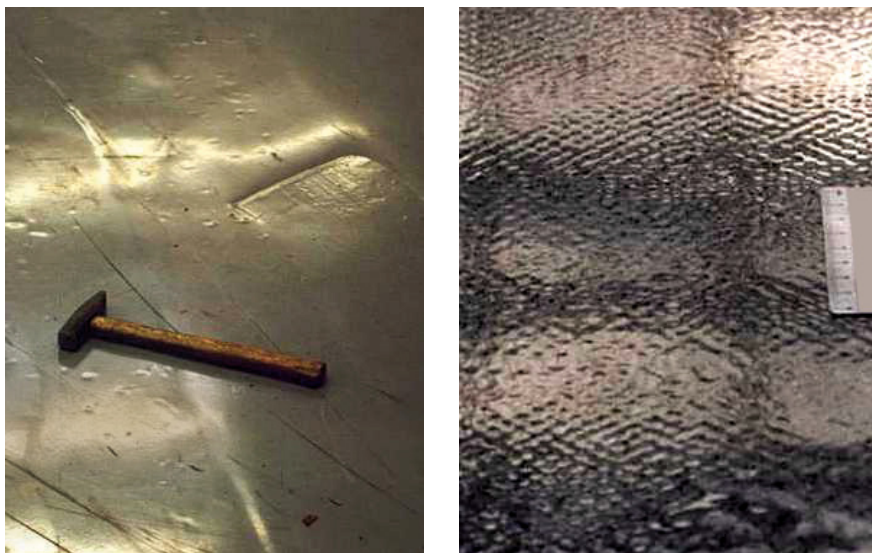
**Bild 47** ■ Erscheinung G  
– Benetzungsstörungen  
beim Beschichten eines  
Fußbodens, die zur krater-  
artigen Ausbildung von  
Fehlstellen führten



**Bild 48** ■ Erscheinung G  
– durch punktartige  
Belastung irreversibel  
deformierte Bodenbe-  
schichtung mit überwie-  
gend plastomeren Verfor-  
mungsanteilen

Bei der Verarbeitung von chemisch vernetzenden Beschichtungsstoffen ist stets eine sogenannte Topfzeit zu beachten, innerhalb derer das Material appliziert werden kann. Am Ende dieser Topfzeit steigt die Viskosität an. Der zunächst flüssige Beschichtungsstoff geht in den Gelzustand über, dem dann die Verfestigung folgt. Wird der Beschichtungsstoff in der Gelphase mit Applikationswerkzeugen etc. bearbeitet, können bleibende Verformungen entstehen, weil in diesem Stadium natürlich auch das Verlaufsvermögen des Beschichtungsstoffs abnimmt. Bild 49 zeigt anhand einer Bodenbeschichtung das Ergebnis zweier, während der Gelphase, unerlaubter Eingriffe mittels Applikationswerkzeugen.

Bei der stahlbaumäßigen Bearbeitung von Stahlkonstruktionen werden häufig Oberflächengeometrien hinterlassen, die in eine korrosionsschutzgerechte

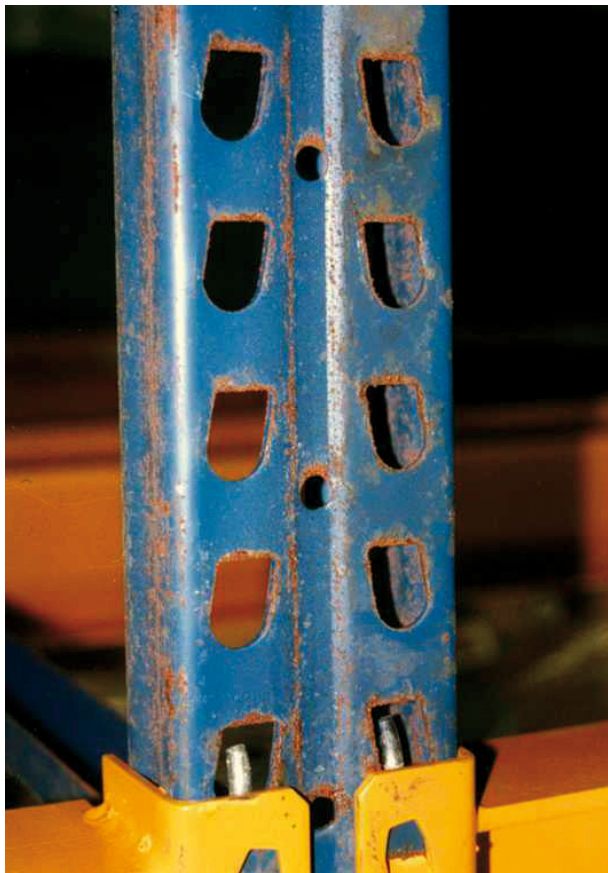


**Bild 49** ■ Erscheinung G – signifikante Schichtdickenschwankungen als Folge des Überschreitens der Verarbeitungszeit eines 2 K-Epoxidbeschichtungsstoffs, der dann einsetzenden Viskositäts-erhöhung und der damit verbundenen Verlaufsbeeinträchtigung; links: Wellen aus Rakelapplikation, rechts: Raster aus Stachelwalzenentlüftung

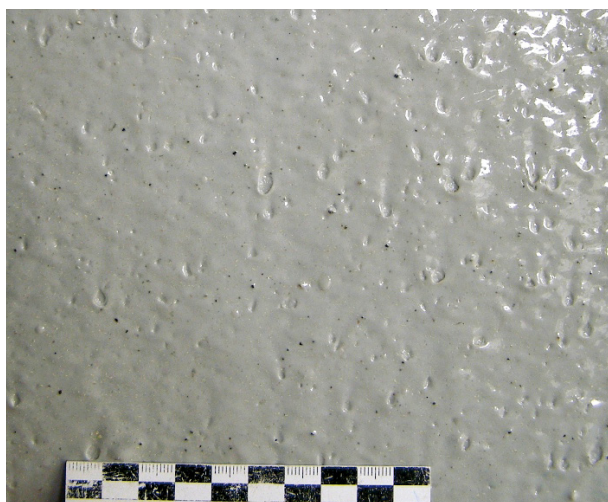
Gestalt überführt werden sollten [20]. Geschieht dies nicht, entstehen über den Effekt der **Kantenflucht** zu applizierender Beschichtungsstoffe dort Schichtdickenschwachstellen, die zu einem vorzeitigen Versagen der Korrosionsschutzwirkung führen. Bild 50 zeigt die von solchen Kanten ausgehenden Rostvorgänge und Rostunterwanderungen der Beschichtung.

Die als Erscheinung H dargestellte Imperfektion – sie weist in der Draufsicht eine kreis- bis ellipsenförmige Struktur auf – rührt daher, dass in die applizierte Beschichtung im noch flüssigen Zustand eine andere Flüssigkeit in Tropfenform gelangte. Voraussetzung für die Ausbildung der **Mulde** ist, dass keine **Affinität** dieser flüssigen Substanz mit der noch flüssigen Beschichtung besteht. Dies ist z. B. der Fall, wenn ein nicht wassermischbarer Beschichtungsstoff im frischen Zustand auf senkrechten und waagrechten Flächen von Regentropfen getroffen wird, die dort bis zur Verdunstung eine Zeit lang liegen bleiben. Bild 51 zeigt diese Erscheinung am Bauobjekt.

Auf horizontalen Flächen bilden sich Mulden eher kreisförmig, auf vertikalen Flächen eher ellipsenförmig (vertikal orientiert) aus. Treibende Kraft zur Ausbildung einer konkav gekrümmten Mulde ist die Oberflächenspannung des Regentropfens. Eine Rückverformung des Beschichtungsstoffs nach Verdunsten des Wassers erfolgt nicht, weil bis dahin eine partielle Verfestigung



**Bild 50** ■ Erscheinung G  
– frühzeitiges Versagen  
des Korrosionsschutzes an  
Kanten, weil die Schicht-  
dicke wegen der soge-  
nannten Kantenflucht des  
Beschichtungsstoffs dort  
zu gering ausfiel



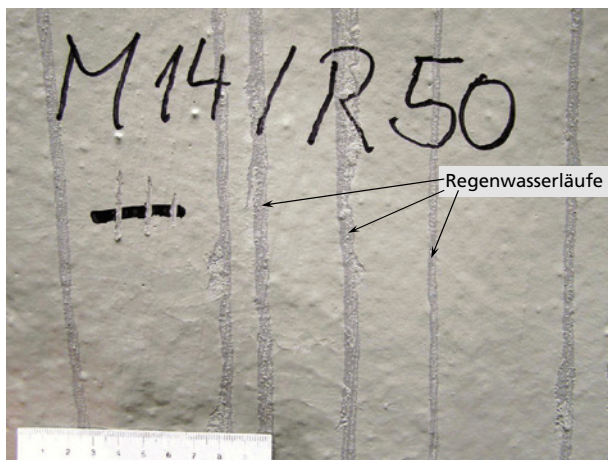
**Bild 51** ■ Erscheinung H  
– kleinflächige Vertiefungen  
in der Beschichtung,  
hervorgerufen durch Be-  
regnung in einem frühen  
Stadium; der Beschich-  
tungsstoff war noch  
flüssig; die Oberflächen-  
spannung der Wassertropfen  
hat eine konkave Ausbeulung  
erzwungen, die nach der Ver-  
dunstung der Wassertropfen  
wegen des vernetzungsbedingt  
fortgeschrittenen Viskosi-  
tätsaufbaus nicht mehr  
rückverformbar war

zur Beschichtung stattgefunden hat. Mit der bleibenden konkaven Krümmung ist der Schichtquerschnitt geschwächt mit den daraus folgenden negativen Erscheinungen für die bautenschutztechnische Wirkung.

Die Erscheinung H kann auch einer Form der Oberflächenimperfection zugeordnet werden, die mit der zunehmenden Anwendung wässrig basierter Beschichtungsstoffe an Ingenieurbauwerken zusammenhängt.

Bild 52 zeigt eine Versagensform der Erscheinung H in einer großflächigen vertikalen Stahlbetonschale. Nacheinander sind zwei Lagen eines wässrig basierten 2K-Epoxidbeschichtungsstoffs appliziert worden. Nach Applikation der zweiten Lage setzte kurzzeitig danach ein Regenguss ein. Im oberen Bereich setzte der Abtrag des noch flüssigen Beschichtungsstoffs flächig, im unteren Bereich läuferartig ein. Dies war, im Gegensatz zu der zuvor beschriebenen Art der Erscheinung H, möglich, weil zwischen Regenwasser und dem verwendeten Beschichtungsstoff eine große Affinität bestand.

Mit dieser Variante der Erscheinung H wird einer der großen Nachteile der wässrig basierten Beschichtungsstoffe gegenüber den lösemittelhaltigen bzw. dem Total-Solid-Typen deutlich.



**Bild 52** ■ Erscheinung H  
– läuferartiger Abtrag  
einer Deckschichtlage  
eines wässrig basierten  
Epoxidbeschichtungs-  
stoffs durch frühzeitige  
Regeneinwirkung



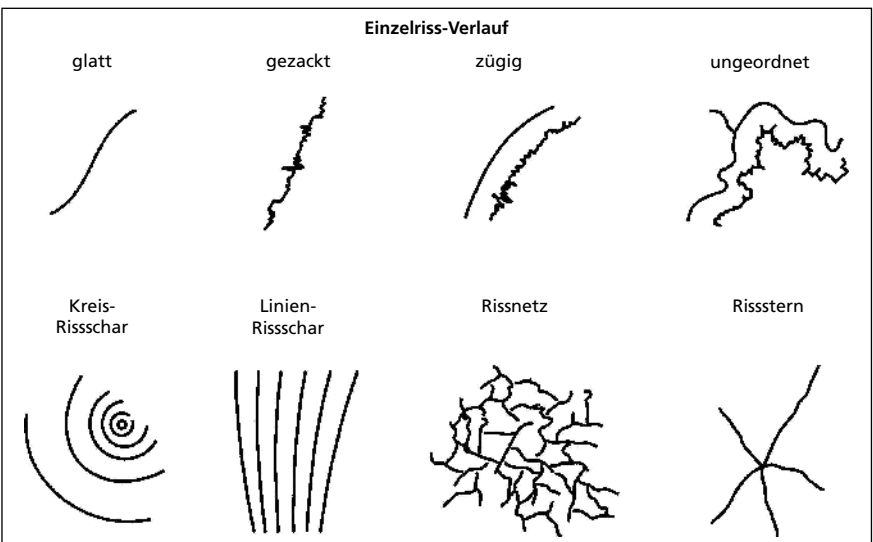
### 3.5 Risse (R)

Risse in einer Beschichtung treten dann auf, wenn diese Beschichtung entweder übermäßig gedehnt oder aber an einer angestrebten Verkürzung behindert wird. Die verschiedenen Versagensursachen äußern sich in der Erscheinungsform der Risse, wobei sowohl typische Aufsichten des Risses (Rissverlauf) als auch typische Querschnitte unterschieden werden müssen.

#### 3.5.1 Risse in der Aufsicht betrachtet

Bild 53 zeigt eine Klassifikation von Rissbildern in der Draufsicht. Dabei sind zwei Merkmale entscheidend, nämlich der Verlauf des einzelnen Risses und die gegenseitige Anordnung in einem Gesamtbild. Häufig ist eine rissige Beschichtung von mehreren bis zahlreichen Rissen durchzogen, d. h. es liegt ein Rissbild vor. Einzelrisse treten oft dann auf, wenn z. B. der Untergrund einen sich bewegenden Riss hat und die Beschichtung dieser Bewegung nicht ausweichen bzw. folgen kann. Bild 53 gibt in der oberen Reihe den Einzelrissverlauf und in der unteren Reihe die häufigsten Anordnungen zum Gesamtbild wieder. Neben dieser qualitativen Darstellung können Risse auch quantifiziert werden [21]. Zum Verlauf der einzelnen Risse ist Folgendes festzuhalten:

Als **ungeordnet verlaufende Risse** bezeichnet man solche, deren Verlauf im Gesamtbild keine erkennbare Tendenz der Richtungen aufweist, im Gegen-



**Bild 53** ■ Formen von Einzelrisse und Anordnungen von Rissen in der Draufsicht

satz z. B. zu Rissen mit zügigem Verlauf. Sowohl ungeordnet verlaufende als auch **zügige Risse** können in der Feinstruktur entweder glatt oder gezackt sein, d. h. entweder nur allmähliche oder plötzliche Richtungsänderungen ausführen. Ein **gezackter Verlauf** der Rissränder ist bei harten (spröden) Beschichtungen häufiger, während ein **glatter Verlauf** bei zähhaften (duktilen) oder plastischen (weichen) Schichten vorherrscht. Ob ein Riss zügig oder ungeordnet verläuft, hängt davon ab, ob ihm durch irgendeine Gesetzmäßigkeit, die im Untergrund, in der Beschichtung oder der Beanspruchung begründet sein kann, ein zügiger oder ein ungeordneter Verlauf aufgezwungen wird.

**Kreisrisse**, ebenso auch **Scharen von Kreisrisen**, sind typisch, wenn von einem Zentrum radiale Biegezugspannungen ausgehen. Solche Spannungen treten z. B. als Folge einer punktförmigen Belastung auf. Es entstehen umso mehr konzentrische Risse, je größer die Deformation der Beschichtung bzw. des beschichteten Untergrunds und je spröder die Beschichtung ist. Der Widerstand gegen punktförmige Belastung und dabei möglicherweise auftretende Kreisrisse wird durch Impact-Versuche mit einem fallenden Gewichtsstück geprüft [22].

Mehr oder weniger parallel verlaufende Risse zeigen an, dass die Beschichtung mit einer **Linien-Rissschar** senkrecht dazu gedehnt bzw. das beschichtete Bauteil senkrecht dazu gestreckt oder gebogen wurde. Im zuletzt genannten Fall entstehen Risse bzw. Rissscharen parallel zur Biegekante.

Bei Holzlackierungen findet man oft Linien-Rissscharen, deren Verlauf mit der Faserrichtung des Holzes übereinstimmt. Risse dieser Art werden dadurch verursacht, dass die Beschichtung im Laufe der Zeit infolge Alterung immer weniger dehnfähig wird, während das durch natürliche Schwankungen der Luftfeuchte verursachte Schwinden und Quellen des Holzes periodisch wiederkehrende Dehnungen oder gar Biegebeanspruchungen hervorruft. Diese sind wegen der zuweilen ausgeprägten Anisotropie von Hölzern senkrecht zur Faser etwa 5- bis 10-fach größer als parallel zur Faserrichtung. Bild 54 zeigt am Beispiel einer Türfüllung eine Rissbildung parallel zur Holzfaser. Risse dieser Art können z. B. durch Wahl der Holzart und durch Einsatz von Beschichtungsstoffen mit geringer alterungsbedingter Versprödung gemindert werden. Eine allseitige Beschichtung von Holzbauteilen wirkt sich dämpfend auf hygroskopisch verursachte Volumenänderungen aus, womit auch die Neigung zur Rissbildung vermindert wird.

Gegenüber dem hygroskopischen Einfluss sind Temperaturänderungen vergleichsweise wenig am ›Arbeiten‹ des Holzes beteiligt.

Bild 55 zeigt den Ausschnitt der Schaleninnenseite eines Kühlturms. Dort haben sich unter bestimmten konstruktiven und thermischen Bedingungen scharenartig als Folge von Ringzugspannungen, d. h. Verkürzungsbestrebun-



**Bild 54** ■ Parallel zur Holzmaserung auftretende Risscharen in einer Türlackierung, die auf den ausgeprägt anisotrop sich verlängernden Holzuntergrund zurückgehen



**Bild 55** ■ Vertikal scharenartig auftretende Risse in der Stahlbetonschale eines Naturzugkühlturms unterhalb des oberen Randglieds als Folge schwind- und temperaturbedingter Ringzugspannungen

gen des Betons, Risse eingestellt. Letztlich geht es dann darum, die Oberfläche mit rissüberbrückenden Beschichtungen zu versehen, um die Stahlbewehrung gegen das Eindringen von korrosionsauslösenden Substanzen (Wasser, Abgase) abzuschirmen.

In Bild 56 ist der Stahlbetonsockel einer Windenergieanlage gezeigt. In diesen Sockel ist das Stahltragrohr des Flügelrads einbetoniert. Wenn das Flügelrad in den Wind gerichtet ist, müssen die zur Leeseite gerichteten Kräfte in den Sockel abgetragen werden. Dadurch entstehen in der luvseitigen Wandung des Stahlbetonsockels Biegezugspannungen, die letztlich nach Überschreiten der Zugfestigkeit des Betons der luvseitigen Sockelwand die ringförmigen Risse verursachen.

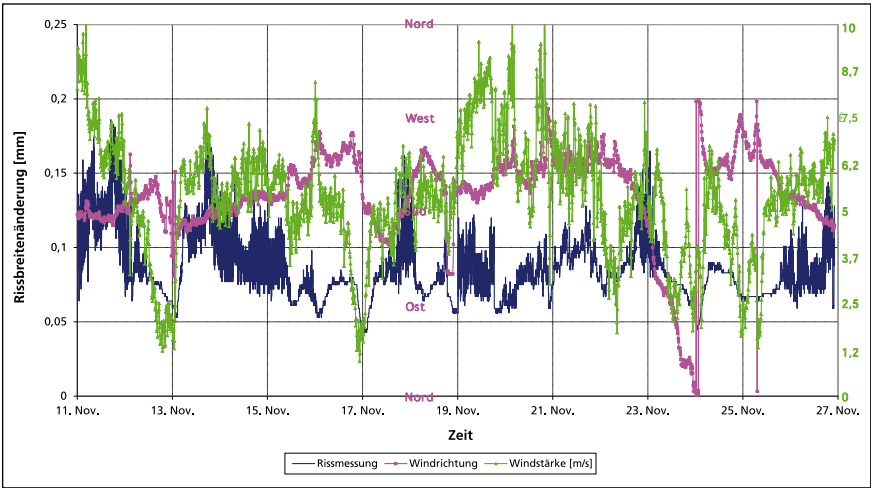
Bild 57 zeigt eine Detailaufnahme der Rissuferzone, an der man das Versagen der ›rissüberbrückenden‹ Beschichtung direkt über dem Riss sowie in der Uferzone erkennt. Der aktuelle Riss hat eine Breite zwischen 0,1 und 0,15 mm. Bei normaler Rissbreitenänderung, wie sie auch vom Regelwerk [3] abgedeckt ist, dürfte unter sonst normalen Bedingungen kein Versagen auftreten. Aus der dynamischen Windbelastung des Flügelrads entsteht jedoch ein darauf aufgesetztes  $\Delta w \geq 0,2 \text{ mm}$ , das zumindest temporär kurzzeitige Dehnwechsel beinhaltet. Die in situ ermittelte Rissbreitenänderungscharakteristik in Abhängigkeit von Windrichtung und Windstärke ist in Bild 58 für eine zweiwöchige Messphase dargestellt. Die dadurch verursachte stärkere Werkstoffermüdung lässt die sogenannte regelwerkskonforme [3] Beschichtung in den Mittel- bis Starkwindphasen frühzeitig versagen.

**Bild 56** ■ Ringförmige Risse im Stahlbetonsockel einer Windenergieanlage auf der Luvseite als Folge der windbedingten Pendelwirkung



**Bild 57** ■ Totalversagen einer regelwerkskonform rissüberbrückenden Beschichtung, weil die in-situ-Rissbreitenänderungscharakteristik die Regelwerksvorgaben weit überschreitet





**Bild 58** ■ Rissbreitenänderung eines ringförmigen Risses im Stahlbetonsockel einer Windenergieanlage als Folge der durch Windeinwirkung auftretenden Pendelbewegung des Stahltragrohrs, abhängig von Windrichtung und Windstärke

Rissnetze sind die Folge eines zweidimensionalen Kräftespiels in der Ebene der Beschichtung. Wenn in einer Beschichtung Rissnetze entstehen, können grundsätzlich zwei verschiedene Ursachen mit gleicher Wirkung infrage kommen:

- Im Verlauf der Alterung (siehe Kapitel 2.8) treten aus der Polymerbeschichtung (typabhängig) niedermolekulare, quasi schwer flüchtige Bestandteile aus.  
Wenn bei lösemittelbasierten 2K-Beschichtungsstoffen große Nassfilmdicken erzeugt werden, setzt zunächst die chemische Vernetzung ein und baut ein räumliches Netz an Molekülstrukturen auf. Aufgrund der relativ hohen Schichtdicken kann die Lösemittelretention die vollständige Volumenabnahme bis zum Festkörper merklich hinauszögern. Dieser hinausgezögerte Austrocknungsprozess führt, zusammen mit austretenden niedermolekularen Bindemittelbestandteilen, gegen das räumliche Netz der Molekülstrukturen zu Kontraktionsbestrebungen.  
Senkrecht zur Beschichtungsebene kann das Volumen praktisch ungehindert abnehmen, nicht jedoch parallel dazu, weil die Volumenabnahme wegen des Verbunds zum Untergrund daran gehindert wird. Dieses Kontraktionsbestreben führt parallel zur Oberfläche zu Schrumpfspannungen, die sich, begünstigt durch die beim Verspröden abnehmende Kohäsionsfestigkeit der Beschichtung, in einer Netzrissbildung »entspannen«. Bild 59 zeigt das Ergebnis dieses Schrumpfvorgangs.

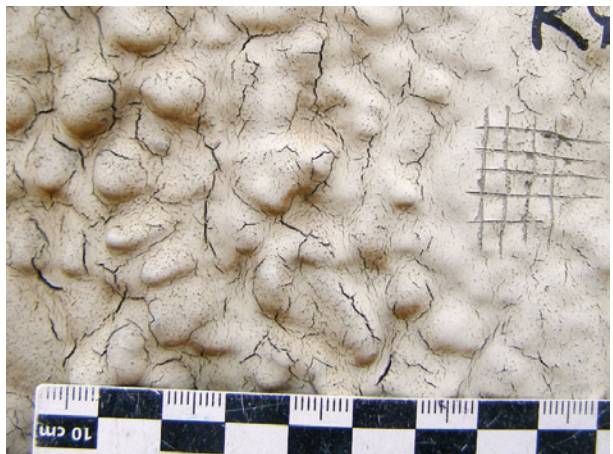


Bild 60 zeigt den Einfluss der Schichtdicke auf die Schrumpfrissbildung. In einer Verknennung der Effektivität des Oberflächenschutzes ist eine waschbetonähnliche Betonbauteiloberfläche mit einem lösemittelhaltigen 2K-Beschichtungssystem in überhöhter Auftragsmenge pro Beschichtungslage versehen worden. Dies hat dazu geführt, dass in den Tieflagen eine bis zu 2 mm dicke Schicht, auf den Hochlagen dagegen maximal eine 0,5 mm dicke Schicht verblieb. Vorzugsweise in den Tälern traten wegen des größeren Volumenschwundes breite Risse auf, während auf den gerundeten Zuschlagskörnern nur kleine Rissbreiten entstanden. Bemerkenswert ist in Bild 60 noch die gezackt ausgebrochene Schnittstruktur des Gitterschnittversuchs [23], welche die durch Betriebs- und Umgebungsbeanspruchung ausgelöste Versprödung anzeigt. Diese wiederum (siehe oben) befördert die Netzrissbildung.

**Bild 59** ■ Rissnetz in einer gealterten, spröde gewordenen Beschichtung als Folge zweidimensional in der Oberfläche wirkender Verkürzungsbestrebungen

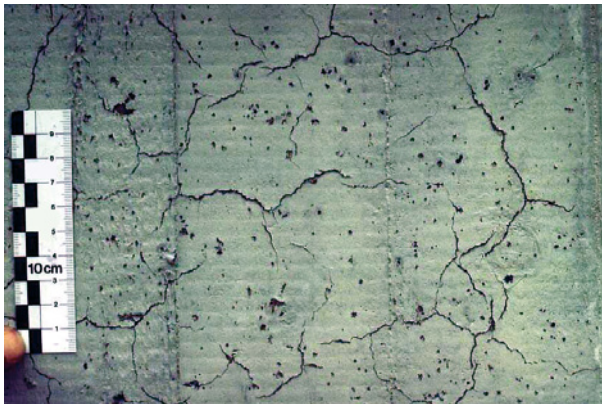


**Bild 60** ■ Schrumpfrisse in Abhängigkeit der Alterung und der Schichtdicke; die netzartigen Risse verlaufen bevorzugt in sogenannten Schichtdickentälern, wo sich beim Applizieren eine größere Anhäufung an Beschichtungsmaterial gebildet hat

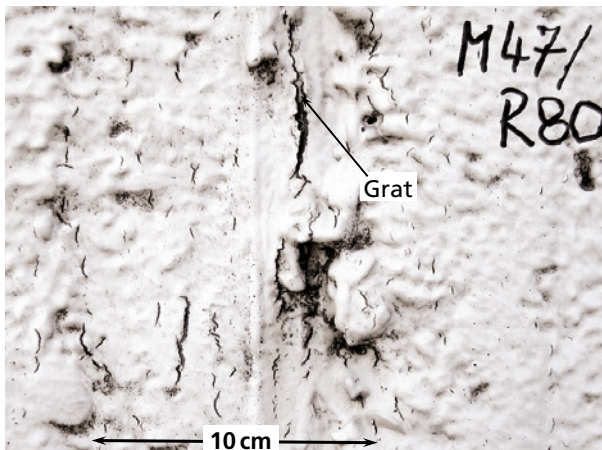


- Wenn sich an Sichtbetonflächen Schwind-Schalenrisse [57] einstellen und diese Flächen dann mit starr formulierten Beschichtungen versehen werden, treten deckungsgleich zu den bereits im Beton vorhandenen Netzen auch solche in der Beschichtung auf. Bild 61 zeigt den Ausschnitt einer so entstandenen Teilfläche. Weil sich solche Bauteile im Freien befinden, sind sie in Mitteleuropa Temperaturwechseln von ca. 50 K ausgesetzt. Diese Temperaturwechsel führen an den Schwind-Schalenrisse zu ganz geringen Rissbreitenänderungen von 1 bis 10 µm. Starr formulierte Beschichtungen können solchen Rissbreitenänderungen insbesondere bei Tieftemperaturen nicht folgen und reißen deshalb deckungsgleich zu den Rissen im Untergrund ein.

Bild 62 zeigt einen Ausschnitt eines beschichteten Betonteils mit vertikalen, stark klaffenden Rissen. Um die klaffenden Risse herum ist die Beschichtung hohl liegend und örtlich aufgeschüsselt. Bild 63 zeigt den gleichen Flä-



**Bild 61** ■ Weitmaschiges Rissnetz aus Schwind-Schalenrisse in einer Betonoberflächenrandzone und in der darauf liegenden starr formulierten Betonbeschichtung



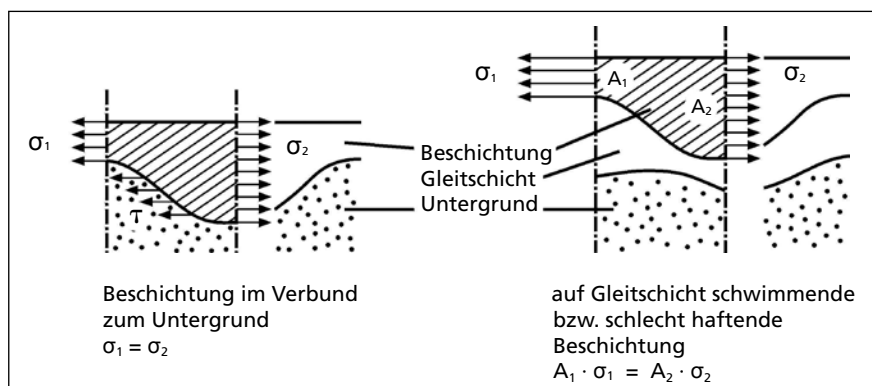
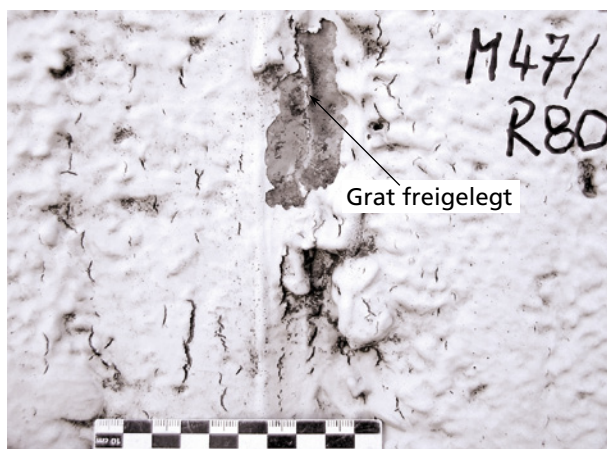
**Bild 62** ■ Vertikal orientierte, stark klaffende Risse in 2K-PUR-Beschichtung mit leicht aufschüsselnden Rändern

chenabschnitt nach dem Abheben der hohl liegenden 2K-PUR-Beschichtung. Deckungsgleich mit dem zuvor stark klaffenden Riss hatte die Oberfläche einen Grat, der mit der 2K-EP-Zwischenbeschichtung versehen worden war. Im Gratbereich war die Schichtdicke der hellgrauen Deckschicht nur halb so dickschichtig wie daran angrenzend.

Risse der gezeigten Art treten bevorzugt dann auf, wenn in einer Beschichtung wegen eines örtlich nicht ausreichenden Haftverbunds zum Untergrund das bereits beschriebene, alterungsbedingte Kontraktionsbestreben das Einreißen begünstigt:

- Wie in Bild 64 im linken Bildteil dargestellt, sind in einer auf Zug parallel zur Oberfläche beanspruchten, aber fest haftenden Beschichtung die Spannungen an Dünn- und Dickstellen nahezu gleich groß  $\sigma_1 = \sigma_2$ , obwohl unterschiedliche Schichtdicken und damit auch unterschiedliche Querschnitts-

**Bild 63** ■ Zustand Bild 62 nach dem Abheben aufgeschüsselter Beschichtungs-teile; darunter liegende Beschichtung ist weich, klebrig, belegt; Risspalt ist identisch mit Grat



**Bild 64** ■ Eigenspannungen in gleitenden bzw. schwimmenden Beschichtungen



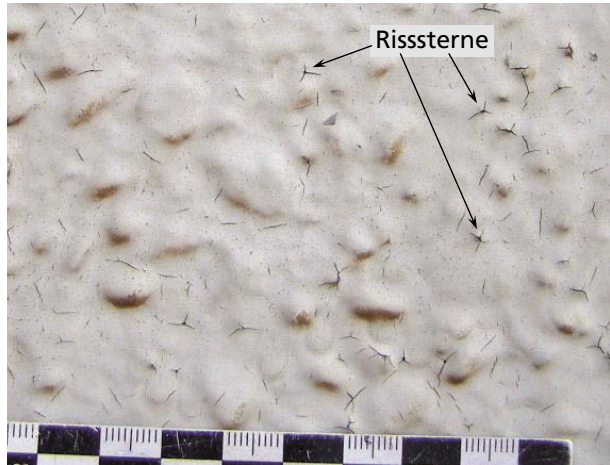
flächen vorliegen. Dabei entstehende Zugspannungen  $\sigma_2$  werden über den Haftverbund als Scherspannungen  $\tau$  in den Untergrund abgetragen.

- Liegt jedoch, wie im rechten Teil von Bild 64 gezeigt, eine verformbare Zwischenlage mit der Wirkung einer Gleitschicht oder ein geschwächter Haftverbund zwischen Beschichtung und Untergrund vor, so können die Differenzkräfte zwischen den geringen und den großen Schichtdicken nicht mehr in den Untergrund abgetragen werden. Die gleichbleibende Membrankraft in der Beschichtung äußert sich an Dünnstellen in relativ hohen Spannungen, weil die Fläche  $A_1$  dort klein ist, während an Dickstellen aufgrund der Verteilung der Kräfte auf eine größere Querschnittsfläche  $A_2$  geringere Spannungen resultieren. Es tritt dann ein vorzeitiger Bruch an den Dünnstellen der Beschichtung ein.

Wenn mehrere, relativ kurze, unregelmäßig verlaufende Risse von einem gemeinsamen Punkt ausgehen, so spricht man gemäß Bild 65 von einem **Rissstern**. Die Rissbreiten sind im Zentrum des Sterns am größten und nehmen mit zunehmender Entfernung ab. Der Ausgang von einem Zentrum zeigt an, dass dort offensichtlich eine Schwachstelle im Querschnitt der Beschichtung vorliegt, z. B. in Form einer eingeschlossenen Luftblase, einem Sandkorn oder einem sonst wie verursachten Schichtdickenminimum. Auch an solchen Sollbruchstellen führen Spannungsspitzen zum Einreißen mit der Fortpflanzung des Risses in Richtung der intakten Beschichtung.

Risse in Beton-Fertigteilplatten entstehen gelegentlich auch durch unsachgemäße Behandlung bei Transport und Montage. Die dabei ursächliche Biegebeanspruchung führt dann zum partiellen Durchreißen der Bauteilquerschnitte. Bild 66 zeigt den Ausschnitt eines mit einer weiß pigmentierten Acrylatbeschichtung versehenen Bauteils. Sehr viele Risse an drei Fassaden des betreffenden Möbelauslieferungslagers waren rostbraun gesäumt. Entgegen der bauseitigen Annahme bestand aber kein Zusammenhang mit der Bewehrung der Beton-Fertigteilplatten [77]. Die Lösung des Problems ist mit der Anwendung einer entsprechend bemessenen rissüberbrückenden Beschichtung gefunden worden.

**Bild 65** ■ Von Schichtdickenminimas ausgehende kurze Einrisse haben ihre Ursache in parallel zur Beschichtungsebene auftretenden Kontraktionsbestrebungen, die begünstigt durch eine alterungsbedingte Versprödung der Beschichtung an Stellen mit der geringsten Schichtdicke und der daraus resultierenden größten Zugspannung die Bildung von Risssternen auslösen.



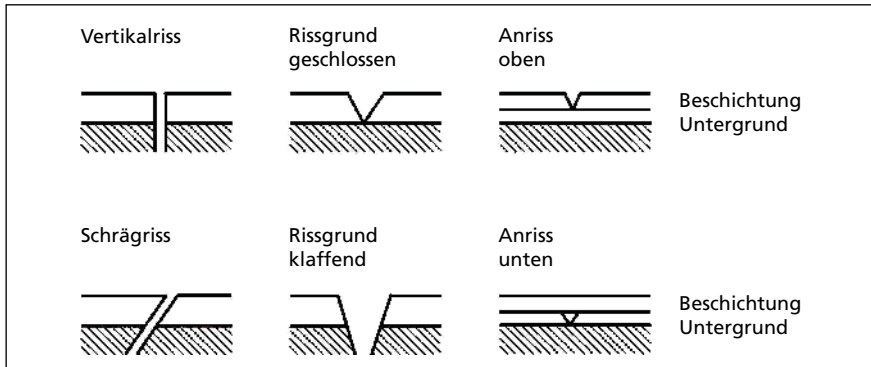
**Bild 66** ■ Hellgrau beschichtete Beton-Fertigteil-Fassadenplatten; bei Transport und Montage entstanden Risse; Befürchtung: Bewehrung rostet, weil sich rostbraune, fahnenartige Ablagerungen gebildet haben; diese These wurde widerlegt [77]



### 3.5.2 Risse im Querschnitt betrachtet

Aus den Gegebenheiten in den Rissquerschnitten lassen sich analog zum Rissverlauf aus der Draufsicht weitere Hinweise zur Entstehung und zur Ursache der Risse gewinnen. In Bild 67 sind typische Querschnitte im Rissbereich schematisch gezeigt, zu denen folgende Erläuterungen angebracht erscheinen:

Senkrecht zur Beschichtungsebene im Untergrund verlaufende Risse setzen sich fast immer mit einem nahezu senkrechten Rissrand in der Beschichtung fort. Schräge Risse im Untergrund pflanzen sich oft auch schräg in der Beschichtung fort. D.h., der Riss im Untergrund dominiert den Verlauf des Risses in der Beschichtung.



**Bild 67** ■ Rissformen von Beschichtungen im Querschnitt

Ist der Rissgrund geschlossen, dann liegt die Ursache des Risses meist ausschließlich in der Beschichtung. Bild 68 zeigt den Fall des Einreißens einer Deckschicht einer WHG-Beschichtung [24], die nach den Regeln des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) [25] als sogenanntes Gewässerschutzsystem aufgebaut ist. Die Einrisse gingen von Schichtdickenschwachstellen oder Imperfektionen im Schichtquerschnitt aus, wie sie im Querschnitt in Bild 69 gezeigt sind. Der Versagensmechanismus geht auf alterungsbedingte Eigenspannungsvorgänge zurück, die in Kapitel 3.5.1 erläutert worden sind. Gefördert wurde die Rissbildung noch dadurch, dass die starr formulierte EP-Deckschicht (1) auf der weichen PUR-Zwischenschicht (2) »schwamm« und die parallel zur Beschichtungsebene entstandenen Zugspannungen nicht kontrolliert in den Untergrund abgetragen worden sind.

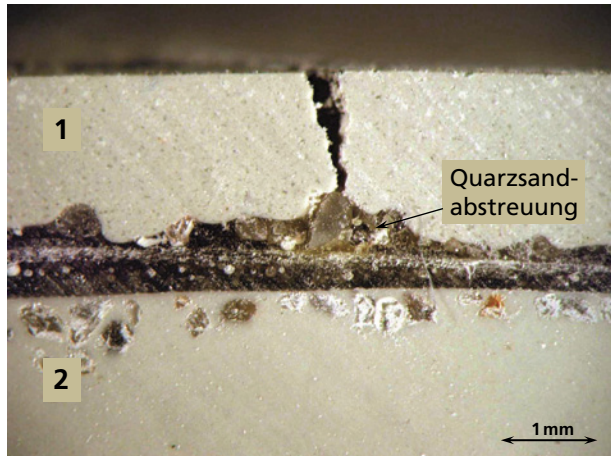
Ein klaffender Rissgrund deutet demgegenüber darauf hin, dass Bewegungen im Untergrund zunächst dort und anschließend in der Beschichtung das Reißen veranlasst haben.

Bei mehrschichtigen Systemen reißen nicht stets alle Schichten. Auch ist es möglich, dass Einzelschichten von mehrlagigen Beschichtungen zu unterschiedlichen Zeiten einreißen. Alterungsvorgänge, die z. B. unter Freibewitterungsbedingungen vor allem die Deckschicht beeinflussen, können dort zum Einreißen führen, während die tieferen Schichten bzw. Schichtzonen schadenfrei bleiben. Bild 70 zeigt die mikroskopische Aufnahme einer rissüberbrückenden Beschichtung für nicht befahrene und nicht begangene Flächen (Kapitel 3.5.3) an einer Stelle über einem sich im Betonuntergrund bewegenden Riss. Die Freibewitterung hat in der Oberflächenzone zu einer Versteifung der flexiblen Schicht geführt, sodass sich dort Scharen von Rissen gebildet haben, die in den Schichtquerschnitt bis in eine Tiefe von ca. 1/10 der Gesamtschichtdicke hineinliefen. Obwohl man die Beschichtung als geschwächt

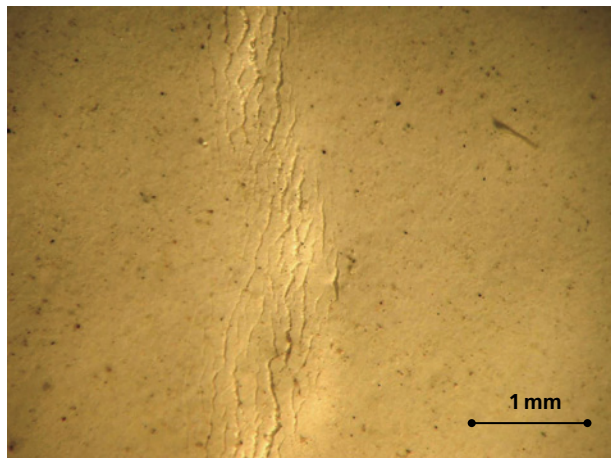
**Bild 68** ■ Mehrlagige Bodenbeschichtung in einem Behälter nach WHG; Deckschicht reißt ein und schüsselt auf



**Bild 69** ■ Kerbwirkung an Quarzkorn (Spannungsspitze) führt zum Einreißen der Deckschicht  
1 starr formulierte Deckschicht  
2 flexibel formulierte Zwischenschicht



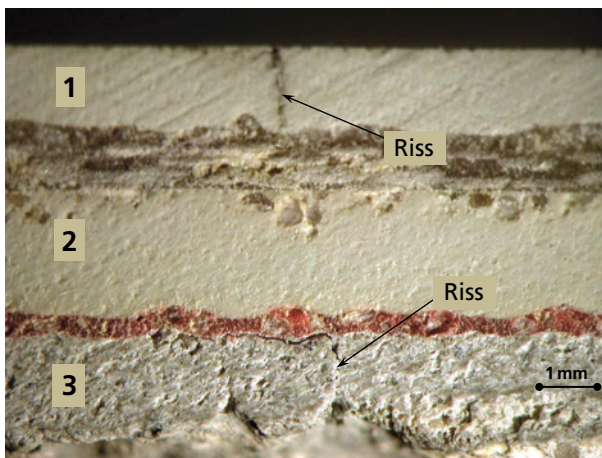
**Bild 70** ■ Risschar über einem im Betonuntergrund sich bewegendem Riss; die Einzelrisse enden in einer Tiefe von 1/10 der Gesamtschichtdicke



ansehen muss, weist sie keinen Mangel auf, denn der Querschnitt erfüllt die zugesicherte Leistung in Form der verlangten Rissüberbrückungsfähigkeit.

Andererseits können zum Schwinden neigende Grundsichten rissig werden, während die Deckschichten geschlossen bleiben. Risse in der Grundsicht erkennt man dann meist an flachen Vertiefungen, den sogenannten Rillen in der Deckschicht. Wenn rissige Deckschichten vorliegen, können die Grundsichten ohne Weiteres für längere Zeit rissfrei bleiben. Dagegen wird eine Deckschicht – sofern sie nicht rissüberbrückend ist – auf einer gerissenen Grundsicht im Regelfall alsbald auch reißen.

Schließlich sei anhand eines Vertikalschnitts durch eine mehrlagige Bodenbeschichtung mit erhöhten Anforderungen an ihre rissüberbrückende Funktion eine weitere, noch akzeptable Rissbildung gezeigt. In Bild 71 besteht der Beschichtungsaufbau aus den zwei wesentlichen Einzellagen 1 und 2 auf dem Untergrund 3. Im Untergrund erkennt man einen sich bewegenden Riss, der deckungsgleich auch in der starr formulierten Deckschicht auftrat. Letztere dient als mechanische Schutzschicht für die Schicht 2. In der flexiblen, rissüberbrückenden Zwischenschicht ist demgegenüber kein Riss entstanden, weil diese die Wegänderungen des Risses im Untergrund ausgleichen konnte. Da die Deckschicht 1 haftet, an den Rissrändern nicht aufschüsselt und die hauptsächlich wirksamere Schicht 2, wie planmäßig vorgesehen, auch über dem sich bewegenden Riss den Schutz des Untergrunds gegen eindringende schädliche Medien gewährleistet, liegt kein Mangel vor.



**Bild 71** ■ Ein in Schicht 1 und 3 auftretender Riss setzt sich in Schicht 2 nicht fort  
 1 starr formulierte Deckschicht  
 2 flexibel formulierte Zwischenschicht  
 3 Betonuntergrund



### 3.5.3 Rissüberbrückende Beschichtungen

Stahlbetonbauteile erhalten planmäßig Risse. Die Bauteile werden für Biegebelastung so bemessen, dass sie im gerissenen Zustand die Anforderungen an die Tragfähigkeit erfüllen. Das dauerhafte Verschließen von Rissen durch flexibel formulierte Beschichtungen ist zur Abwehr bestandsschädigender Folgen, z. B. durch Korrosion von Bewehrungsstählen oder durch chemische Zersetzung von Baustoffen aufgrund von Nutzungseinflüssen usw., oft zwingend notwendig.

Eine rissüberbrückende Wirkung wird zuweilen auch von Beschichtungen auf Putzen und auf Porenbetonbauteilen verlangt. Bei der noch neuen Bauart der Abdichtung im Verbund mit Fliesen und anderen Belägen werden flexible Dichtungsschlämmen (Beschichtungen) verwendet, die auch über Rissen im Untergrund ihre Abdichtwirkung beibehalten müssen.

Nach dem WASSERHAUSHALTSGESETZ [24] müssen Auffangwannen bzw. Auffangräume für wassergefährdende Stoffe mit Beschichtungen versehen sein, die nach den Bau- und Prüfgrundsätzen des DIBt [25] einerseits gegen thermische, chemische und mechanische Beanspruchungen beständig sind, und andererseits aber auch Risse im Untergrund überbrücken.

Liegen die betreffenden Bauteile im Freien, so handelt es sich häufig um periodisch bewegte Risse, die überbrückt werden müssen. Die Bewegung der Rissflanken ist dann meist eine Folge der thermischen und gelegentlich auch der hygrischen Umgebungseinflüsse. Abhängig von der Art und der Nutzung eines Bauwerks kann es auch zu Rissbreitenänderungen aus verkehrsbedingten Lastwechseln kommen, z. B. bei Brücken oder in Parkhäusern etc. Bild 72 zeigt die Untersicht einer Parkhausdecke, an der sich Risse gebildet haben. Diese werden von Niederschlagswasser und Tausalzlösung von oben durch-



**Bild 72** ■ Parkdeck-  
untersicht mit wasser-  
führenden Trennrissen  
in Betonplatten

drungen, weil eine oberseitige Abdichtung bis dahin fehlte. Dadurch entsteht eine erhebliche Korrosionsgefahr für die eingelegten Bewehrungsstähe. Beschichtungen, die Risse dieser Art dauerhaft überbrücken sollen, müssen daher nicht nur einen stehenden Spalt überspannen, sondern sie müssen die sich zwischen den Rissufern einstellenden Wegänderungen mitmachen, ohne dadurch ihre Funktion des dauerhaften Rissverschlusses zu verlieren.

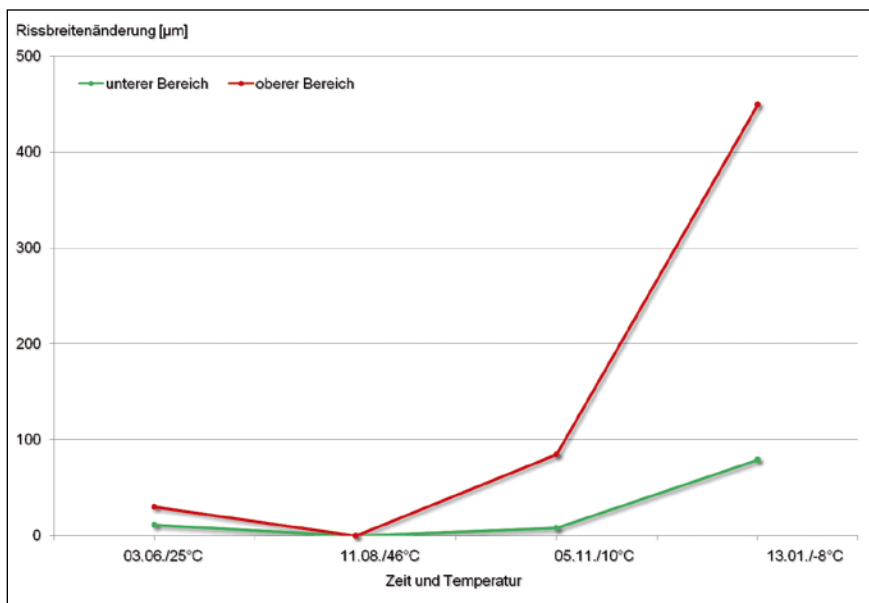
Welche Rissbreitenänderungen dabei entstehen können, zeigt Bild 73 für die Stahlbeton-Balkonkragplatte an einer Fassade [78] und Bild 74 für die Stahlbetondecke in einer unbeheizten Industriehalle [79].

Ein noch anspruchsvolleres Beispiel soll anhand einer Stahlbetonschale eines Naturzugkühlturms gezeigt werden, der im Normalbetrieb genutzt wird, meridionale Trennrisse aufweist und im Spitzenlastbetrieb gefahren wird. An solchen Sonderbauwerken bewegen sich Risse nicht nur temperaturwechselgeneriert, sondern auch noch windinduziert.

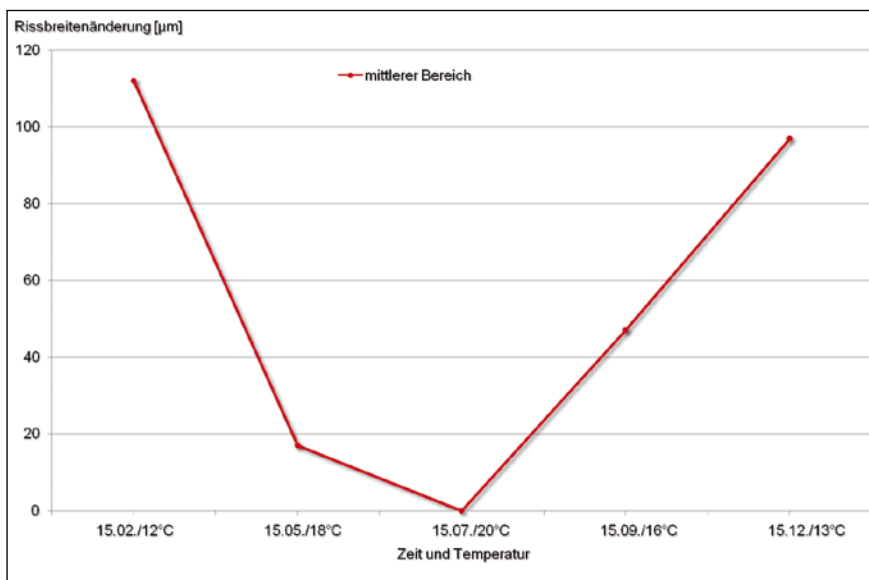
In Bild 75 erkennt man mittig vertikal den Trennriß in der Schale. Über diesem Riss ist ein Sensor mit Schutzkapsel installiert. Mit diesem kann die Rissbreitenänderungscharakteristik aufgezeichnet werden. Bild 76 zeigt einen knapp vierwöchigen Zeitabschnitt der Rissbreitenänderung eines Versuchs, der über ein ganzes Jahr gelaufen ist. In diesen Jahreszyklus gehen dann die Einflüsse der Betriebstemperaturwechsel, der Temperaturwechsel im Freien, im Tages- und im Jahresverlauf, und die Einwirkung des Windes ein. Es handelt sich dabei um relativ ausgeprägte Rissbreitenänderungen.

Wenn die klimatischen Randbedingungen in geringeren Grenzen schwanken, wie z. B. in Innenräumen oder im eingeeordneten Bereich, wird der Risspalt nach seiner Entstehung weitgehend in Ruhestellung verharren oder sich nur geringfügig ändern. Gegenüber dem im Temperaturwechselbereich periodisch bzw. verkehrs- und windlastbedingt dynamisch bewegten Riss wird die Bemessung einer Beschichtung dann einfacher. In allen aufgezeigten Fällen gilt jedoch, dass sich die Bemessung einer rissüberbrückenden Beschichtung immer an der Rissbreitenänderung und der damit im Zusammenhang stehenden Beanspruchung bzw. dem Ermüdungsverhalten orientieren muss.

Wenn eine Beschichtung auf Bauteilen deckungsgleich zu vorhandenen Rissen rissig wird, erhebt sich natürlich die Frage, ob die Beschichtung diese Risse hätte überbrücken sollen oder müssen. Wenn eine Rissüberbrückung in der Ausschreibung gefordert war, muss diese Frage uneingeschränkt bejaht werden. In einem solchen Fall müssen flexibel formulierte Beschichtungen eingesetzt werden. Rissbreitenänderungen, wie sie in den Bildern 73, 74 und 76 dargestellt sind, müssen bekannt sein und bei der Wahl entsprechender



**Bild 73** ■ Rissbreitenänderung in einer Stahlbeton-Balkonkragplatte im Freien

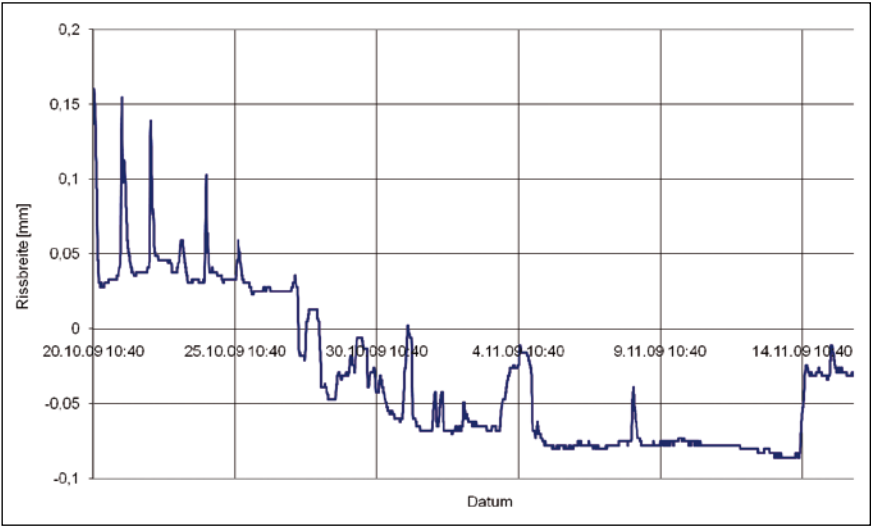


**Bild 74** ■ Rissbreitenänderung in der Stahlbetondecke einer geschlossenen, aber unbeheizten Industriehalle





**Bild 75** ■ Sensor zur Erfassung von Rissbreitenänderungen an der Schaleninnenseite eines Naturzugkühlturms



**Bild 76** ■ Rissbreitenänderung an der Schaleninnenseite eines Naturzugkühlturms während des Betriebs; maximale Rissbreitenspannweite ca. 200 µm

Beschichtungssysteme berücksichtigt werden. Hilfestellungen geben einschlägige Regelwerke und Merkblätter: [2], [3], [25], [26], [27].

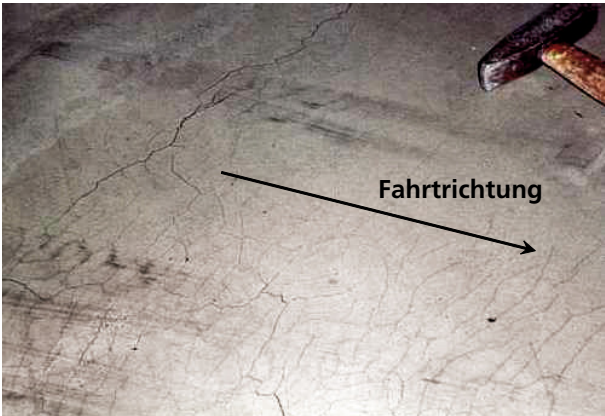
Wenn die Charakteristika der Rissbreitenänderung vorliegen, die mit Anforderungsprofilen herkömmlicher Regelwerke nicht abgedeckt werden, sind durch Sonderprüfungen im Einzelfall unter Verwendung spezieller Prüfanlagen Verwendungsnachweise zu erstellen. Dabei können auch Reserven der Rissüberbrückungsfähigkeit, wie sie unter [80] beschrieben sind, berücksichtigt werden.

Bei Einhaltung spezieller Bedingungen, wie z.B. ausreichender Mindestschichtdicken (siehe Kapitel 4.2) und ebenflächigem Untergrund (siehe Kapitel 2.5), können flexible Beschichtungen langfristig rissüberbrückend sein [81].

Rissüberbrückende Eigenschaften können nur mit Mehraufwendungen erreicht werden: Es treten höhere Materialkosten wegen flexibler Formulierung des Beschichtungsstoffs auf und es werden größere Schichtdicken erforderlich. Des Weiteren sind die Kosten der Verarbeitung wegen des größeren Materialaufwands sowie wegen aufwendigerer Maßnahmen zur Untergrundvorbereitung und Untergrundvorbehandlung höher.

Wenn an rissüberbrückenden Beschichtungen Schäden auftreten, dann sind diese häufig auf folgende Ursachen zurückzuführen:

- **Zu geringe Schichtdicke.** Planer, Beschichtungstoffhersteller, insbesondere aber Ausführungsunternehmer müssen besondere Maßnahmen zur Einhaltung der vereinbarten Mindestschichtdicken ergreifen [82]. Die Schichtdicken müssen im Wege der Eigenüberwachung, zweckmäßigerweise gestützt durch eine qualifizierte Fremdüberwachung, am Bauobjekt geprüft und bewertet werden [83].
- **Senken bzw. Kerben** in der Beschichtung. Meist sind diese durch lokale Unebenheiten des Untergrunds (fehlende Untergrundvorbehandlung, siehe Kapitel 2.5) oder durch die Applikationsmethode (Schichtdickenschwankung, Luftblaseneinschlüsse etc.) bedingt.
- **Falsche Einschätzung der tatsächlichen Rissbewegung.** In den Regelwerken (z. B. [3, 26]) werden Rissüberbrückungsklassen angegeben. Diese sind als Richtgrößen anzusehen. Tatsächlich können sich Rissbreitenänderungen (siehe Bild 73) deutlich oberhalb der ›regelwerkskonformen‹ ( $\Delta w = 0,2 \text{ mm}$ ) Rissbreitenänderung einstellen (z. B.  $\Delta w = 0,45 \text{ mm}$ ).
- **Mechanische Einwirkungen**, z. B. durch Scherkräfte, die bei Brems- und Beschleunigungsvorgängen von Fahrzeugen auftreten. Dies äußert sich dadurch, dass Teilbereiche der Beschichtung abgetragen werden, oder dass Schubrisse senkrecht zur Fahrtrichtung entstehen, wie dies Bild 77 an der Fußbodenbeschichtung in einem Industriebetrieb zeigt.
- **Fehlanwendungen** bei vorgegebenen Schichtenfolgen. Das Objekt ist die Stahlbetonschale eines Naturzugkühlturms, in der sich zügig verlaufende Risse gebildet haben. Bild 78 zeigt eine Stelle, an der sich ein Meridianriss und ein Betonierfugenriss kreuzen. Bei der Ertüchtigung [67] ist ein als Sonderfall konzipiertes rissüberbrückendes flexibles PUR-System zur Anwendung gekommen. Die schwarzen Markierungen zeigen an, wo nach einer ca. zweijährigen Betriebsbeanspruchung Risse festgestellt worden sind. Bild 79 zeigt den Zustand nach dem ›Aufklappen‹ der Beschichtungsteile. Der Gesamtschichtaufbau sollte von unten nach oben wie folgt sein:



**Bild 77** ■ Durch Brems- und Beschleunigungskräfte von Gabelstaplern traten in der rissüberbrückenden Bodenbeschichtung senkrecht zur Fahrtrichtung scharenartige Risse auf



**Bild 78** ■ Schaleninnenseite eines Naturzugkühlturms im Abgasbetrieb  
1 ungefähre Verlauf des Meridianrisses  
2 ungefähre Verlauf des Betonierfugenrisses  
3 Verlauf des Risses der Beschichtung über dem Meridianriss  
4 Verlauf des Risses der Beschichtung über der Betonierfuge



**Bild 79** ■ Schalenabschnitt (Bild 78) nach Abnahme des enthafteten Beschichtungsteils  
5 keine Risse in der verbliebenen rissüberbrückenden Teilschicht

- ▣ Untergrundvorbehandlung mit PCC-Feinmörtel,
- ▣ Grundbeschichtung auf EP-Basis,
- ▣ zweilagige flexible Zwischenbeschichtung auf PUR-Basis,
- ▣ einlagige Deckbeschichtung (Schutzschicht) auf PUR-Basis.

Vorgefunden wurde noch die starr formulierte Epoxid-Zwischenbeschichtung zwischen flexibler PUR-Beschichtung und PUR-Deckbeschichtung, die ausschließlich für den Schalenbereich außerhalb der Rissüberbrückungszone vorgesehen war.

Die rissüberbrückende PUR-Zwischenschicht wurde zweilagig appliziert. Der notwendige Haftverbund kann nur dann erzielt werden, wenn kurz hintereinanderliegende Zeitfenster (Größenordnung Stunden) eingehalten werden. Es kann als gesichert gelten, dass diese Maßgabe nicht eingehalten worden ist. Die Verbundschwäche trat als Adhäsionsversagen auf. Zur Rissbildung ist es schließlich dadurch gekommen, dass Rissbreitenänderungen im Meridianriss und im Betonierfugenriss der Kühlturmschale senkrecht zur Rissrichtung Zugspannungen im Beschichtungssystem generiert haben. Diese sind durch die verbliebene 1. Lage der PUR-Zwischenschicht planmäßig ausgeglichen worden. Im darüberliegenden Schichtenpaket aus der zweiten Lage des flexiblen PUR der starr formulierten EP-Schicht und der PUR-Schutzschicht kam es dagegen zum nahezu deckungsgleichen Einreißen mit den Betonrissen.

Die Ursache geht letztlich darauf zurück, dass die (nicht vorgesehene) starre EP-Schicht eine Dehnung entsprechend der Rissbreitenänderung nicht zuließ, es durch Scherbeanspruchung zum Adhäsionsbruch zwischen den geschwächt verbundenen beiden Lagen der flexiblen PUR-Schichten kam und letztlich dann auch zum Einreißen in der EP-Zwischenschicht mit der Folge, dass die in ausreichendem Haftverbund befindliche PUR-Deckschicht mit eingerissen worden ist.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Anwendung rissüberbrückender Beschichtungen an Fassaden, bei der Betoninstandsetzung und der Anlagenertüchtigung, bei Bodenbeschichtungen mit Abdichtungsfunktion und bei Bauwerksabdichtungen in den zurückliegenden drei Dekaden stark zugenommen hat. Beschichtungen ermöglichen, verglichen mit Dichtungsbahnen, oft konstruktiv einfachere Lösungen, weil Polymerbeschichtungen nachfolgende Schutzschichten eher tragen können, im Gegensatz zu Bitumenbahnen. Die Verwendung zementgebundener, flexibler Schlämmen ermöglicht es außerdem, eine rissüberbrückende Abdichtung im Verbund anzuwenden [41], [42].

Zu beachten ist allerdings, dass die Ansprüche an die Sorgfalt der Planung und an die der Anwendung sehr hoch sind, und dass der Anwendbarkeit bei übermäßigen chemischen, hygrischen und mechanischen Beanspruchungen Grenzen gesetzt sind.

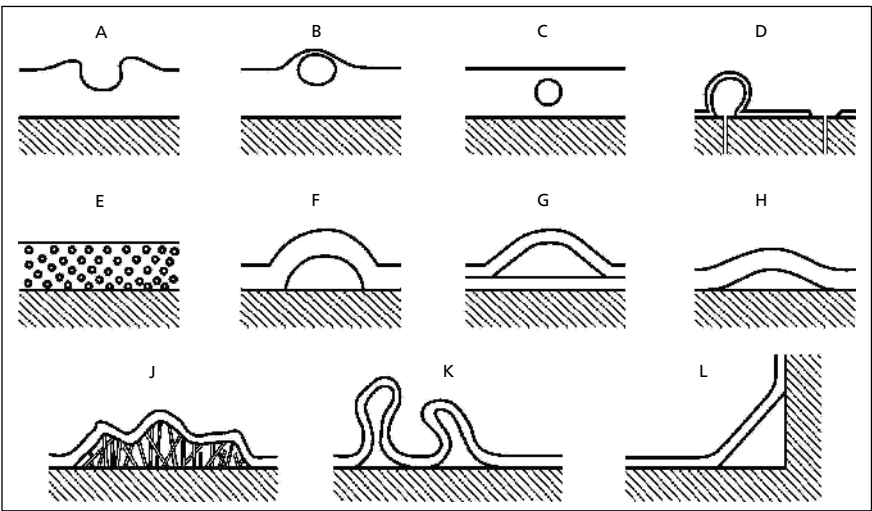
### 3.6 Hohlraumbildung (H)

#### 3.6.1 Erscheinungsformen

Bei Polymerbeschichtungen können zahlreiche Schadensmechanismen zur Ausbildung von Hohlräumen führen. Eine Übersicht möglicher Hohlraumtypen gibt Bild 80. Allen Hohlraumbildungen ist gemeinsam, dass die Einzelschichten ursprünglich aneinander bzw. am Untergrund hafteten, und dass sie dann zumindest partiell voneinander getrennt wurden. Dies kann durch innere Drücke (z. B. Gas-, Flüssigkeits- oder Festkörperdrücke), durch äußere Beanspruchung (z. B. Zug- oder Scherkräfte) oder durch chemisch / physikalische Einwirkungen (z. B. Unterrostung, Quellung) erfolgen.

Die in Bild 80 dargestellten Erscheinungen A bis H bezeichnet man als **Blasen**. Die Formen A bis E entstanden im noch nicht verfestigten Film, d. h. **in statu nascendi** der Beschichtung. Die Formen F, G und H sind nachträglich, d. h. am verfestigten Film aufgetreten. Die Ursachen der Blasenbildung werden in den Kapiteln 3.6.2 bis 3.6.7 näher beschrieben.

Blasenhohlräume können nur durch einen gleichmäßigen inneren Überdruck entstehen, wie er z. B. durch Gase oder Flüssigkeiten erzeugt wird. Wenn dieser Überdruck den Adhäsionsverbund zwischen einzelnen Schichten oder zwischen diesen und dem Untergrund bzw. den Kohäsionsverbund einer einzelnen Schicht überwindet, und wenn an Stellen, wo die Beschichtung einen Hohlraum überbrückt, die Biegesteifigkeit nicht übermäßig groß ist und der innere Druck auf eine weiche und leicht nachgiebige Beschichtung mit



**Bild 80** ■ Formen der Hohlraumbildung in und unter Beschichtungen



dann geringem Verformungswiderstand einwirkt, kann es zu Blasenbildungen kommen.

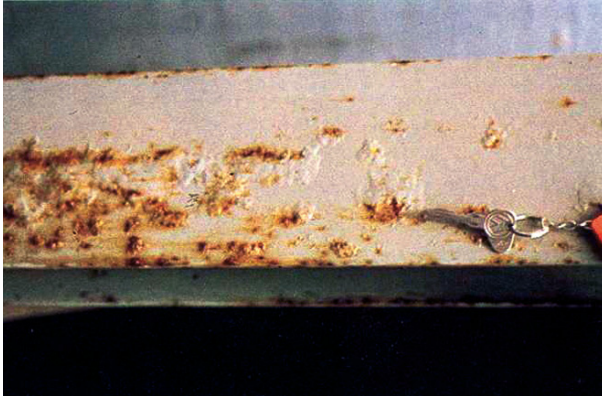
Bei der als **Beule** zu bezeichnenden Erscheinungsform H ist gegenüber den Blasen gemäß F und G der Übergang zur noch haftenden Beschichtung meist allmählich und nicht plötzlich durch Ausbildung eines Knicks erfolgt. Diese Abweichung deutet eine andere Ursache an. Bild 81 zeigt eine Beule in einer Polymerbeschichtung eines Hallendaches. Wegen des örtlich unzureichenden Haftverbunds hat die Sonneneinstrahlung zur Erweichung und zum Absenken des Verformungswiderstands in der Wölphase der ca. 2 mm dicken, flexiblen Polymerbeschichtung geführt. Nach dem Ende der Sonneneinstrahlung ist dann eine Abkühlung der Polymerbeschichtung erfolgt, sodass wegen des ansteigenden Rückverformungswiderstands keine vollständige Zurückbildung erfolgt ist. Aus hintereinander gereihten Zyklen aus Erwärmung und Abkühlung leitet sich die gelegentlich in diesem Zusammenhang beobachtete »Pumpwirkung« ab. Die generelle Entstehungsursache der Beulen wird unter Kapitel 3.6.7 anhand eines Schadensbeispiels erläutert. Daraus wird deutlich, dass Beulen in der Regel größere Durchmesser haben als die Hohlräume, die man als Blasen bezeichnet.

Die unter J dargestellte Schadensform der **Pustel** kann verschiedene Ursachen haben: Es liegt ein Hohlraum vor, der durch einen ungleichmäßigen inneren Druck erzwungen worden ist. Die abgehobene Beschichtung ist lokal spannungsfrei und meist faltig. Man findet unregelmäßig geschichtete, mit feinen Hohlräumen durchsetzte feste Substanzen vor. Pusteln entstehen meist in Beschichtungen auf Metallen, wenn z.B. unter einer beschichteten Oberfläche Korrosion einsetzt. Der unter Volumenerweiterung entstehende Rost hebt dann die Beschichtung in Form einer Pustel ab. Bei der Korrosion von Stahl und Eisen spricht man von **Rostpusteln**. Bild 82 veranschaulicht diesen Sachverhalt an einem beschichteten und durch Rostpustelbildung schadhaf

**Bild 81** ■ Örtliche, durch Wärmeeinwirkung bedingte Verlängerung einer flexiblen Polymerdachbeschichtung bei parallel verlaufender Erweichung durch Erwärmen und Quellen mit der Folge der Beulenbildung







**Bild 82** ■ Unterrostung an einer fehlstellenbehafteten Korrosionsschutzbeschichtung eines Stahlbauteils mit der Bildung von Rostpusteln, welche die Beschichtung hohlraumbildend anheben

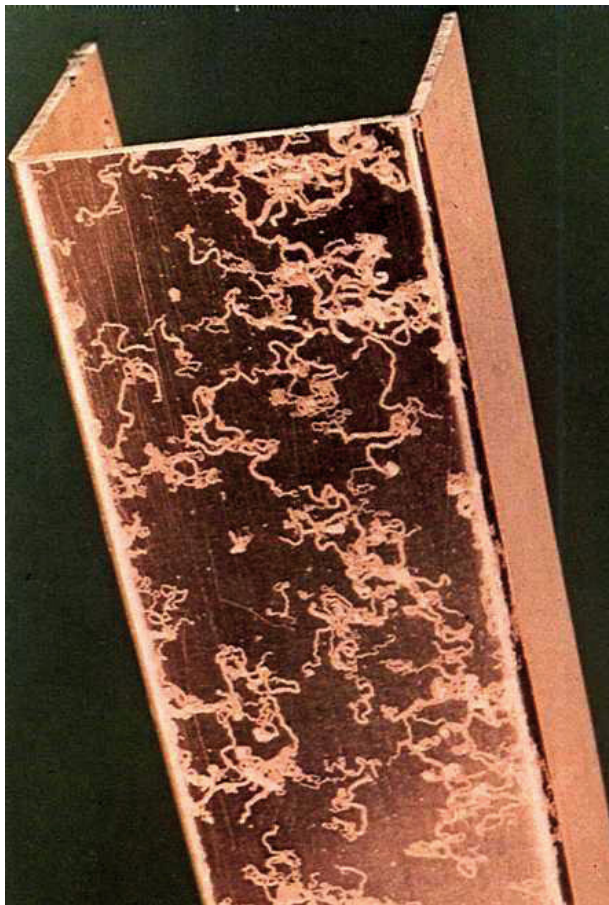
gewordenen Stahlbauteil. Analog verläuft die Pustelbildung bei anderen Metallen ab, wenngleich meist deutlich langsamer wegen der geringeren Korrosionsgeschwindigkeit.

Bei der sogenannten **Filiformkorrosion** [84], auch Filigran- oder Fadenkorrosion genannt, haben die Rostpusteln eine wurmartig gekrümmte Gestalt von etwa 0,5 mm Breite und bis zu mehreren Zentimetern Länge. Der Kopf dieser wurmartigen Gebilde enthält das Korrosionselement, in dem das Metall korrodiert. Der Kopf schiebt sich im Laufe der Zeit voran und hinterlässt eine mit Rost gefüllte flache Röhre. Filiformkorrosion setzt voraus, dass das beschichtete Metallteil in einem korrosiven Klima zwischen 60 und 95 % relative Feuchte lagert, auf dem Metall eine bestimmte Salzverunreinigung vorliegt, der Haftverbund der Beschichtung gering bis mäßig und die Schichtdicke nicht größer als 100 µm ist. In Bild 83 erkennt man die Spuren einer Filiformkorrosion.

Zu pustelartigen Gebilden können auch Holzinhaltsstoffe führen, insbesondere wenn dunkel beschichtete Nadelhölzer unter Wärmeeinwirkung (Sonneneinstrahlung) Harze etc. »ausschwitzten«. Diese Naturharze migrieren einem Weichmacher gleich in die Beschichtung und heben diese partiell vom Untergrund ab. Zur Vermeidung solcher Erscheinungen sollten anfällige Hölzer nicht verwendet bzw. bei der Vorbereitung einer Holzoberfläche sollten harzreiche Stellen beseitigt werden. Bild 84 zeigt pustelartige Erhebungen am Rahmen eines Nadelholz-Fensterflügels, die von ausschwitzendem Harz verursacht worden sind.

Eine Pustelbildung beobachtet man gelegentlich auch auf beschichteten porösen Baustoffen, wenn diese lösliche Salze enthalten und wenn Wasser in den Baustoff direkt unter der Beschichtung gelangen kann. Gelangt die Salzlösung kapillar in die Grenzfläche zur Beschichtung und ist die Beschichtung für Was-

**Bild 83** ■ Filiformkorrosion eines Leichtmetall-Bauteils wegen unzureichender Korrosionsschutzwirkung der farblosen Beschichtung in feuchter Atmosphäre



**Bild 84** ■ Ausschwitzen von harzhaltigen Holz-inhaltsstoffen, die zu pustelartigen Erhebungen der Beschichtung geführt haben



ser durchlässig, insbesondere dann, wenn Fehlstellen vorhanden sind, kommt es zur Verdunstung des Wassers. Zurück bleiben die Salze, die auskristallisieren und die Beschichtung pustelartig abheben. Bild 85 veranschaulicht einen solchen Vorgang anhand einer Beschichtung auf einem Kalksandsteinmauerwerk. Vermieden wird ein solcher Schaden einerseits dadurch, dass lösliche und treibende Salze nicht in den Stein gelangen und andererseits dadurch, dass Regenwasser am Eindringen behindert wird. Letzteres erfolgt – grundsätzlich immer nur nach entsprechender Untergrundvorbereitung – durch hydrophobierende Imprägnierung der Baustoffrandzone vor dem Beschichten. Der Kapillarttransport wird dadurch ausgeschaltet, sodass dann auch keine Salze gelöst, heraustransportiert und dann versintern können.

Die mit der Bezeichnung K dargestellte **Faltung** einer Beschichtung wird fachumgangssprachlich auch als Hochziehen bezeichnet. In der Regel geht diesem

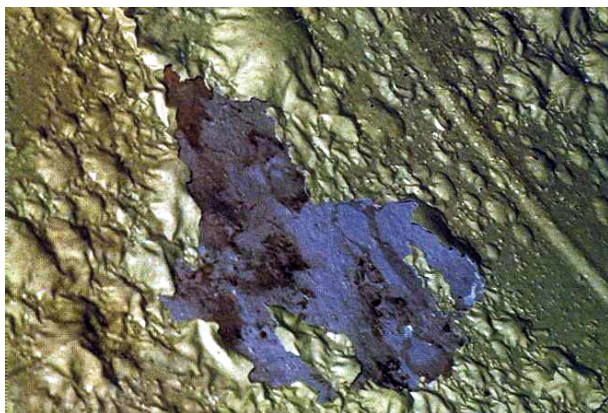


**Bild 85** ■ Pustelartiges Anheben der Kunststoffdispersions-Fassadenbeschichtung durch Salze, die über Fehlstellen herausgelöst wurden und an der Steinoberfläche nach Luftzutritt versinterten

Vorgang eine extreme Quellung voraus (Kapitel 3.8.1). Ein solches Hochziehen tritt immer wieder auf, wenn bestimmte, physikalisch trocknende Beschichtungen mit Beschichtungsstoffen, die selbst Lösemittel enthalten, überstrichen werden. Einen ganz besonderen Fall dieser Art zeigt Bild 86, jedoch hat dort das Füllgut eines Stahltanks durch übermäßiges Quellen die dafür nicht geeignete Beschichtung zum Auffalten gebracht.

Die mit der Bezeichnung L dargestellte Hohlraumbildung geht auf Zugspannungen in der Beschichtung zurück. Die Besonderheit ist die örtliche Geometrie des beschichteten Bauteils in Form der einspringenden Ecke. Die Beschichtung vermindert ihre Spannungen dadurch, dass sie sich an einspringenden Ecken vom Untergrund abzieht, unter der Voraussetzung, dass der Haftverbund zum Untergrund oder zu einer weiteren Schicht gering ist. Daraus ergibt sich die Konsequenz, dass nur Beschichtungen mit geringen Eigenspannungen angewendet werden und dass wirksame Maßnahmen zur Erzielung eines ausreichenden Haftverbunds getroffen werden.

**Bild 86** ■ Unvollständig vernetzte Epoxidbeschichtung ist von einem Tankfüllgut so stark angequollen, dass der Haftverbund aufgehoben und die Beschichtung aufgefaltet worden ist



### 3.6.2 Blasen mit nachrangiger Bedeutung

Gasblasen, die bereits im Flüssigzustand einer Beschichtung entstehen, (Typen A bis C in Bild 80) können auf Luft zurückgehen, die beim Vermischen der Komponenten von 2K-Beschichtungsstoffen oder beim Rühren von 1K-Beschichtungsstoffen hineingearbeitet worden ist. Es kann sich aber auch um Luft aus dem Untergrund handeln. Weil Luft leichter ist als Beschichtungsstoffe, schwimmen die Blasen bei horizontalen Bauteilen an die Oberfläche. Der Auftrieb wird durch die Viskosität (Zähflüssigkeit) des Beschichtungsstoffs behindert. Hat eine Blase durch Aufschwimmen die Oberfläche erreicht, so zerplatzt sie meist und die Oberfläche glättet sich wieder. Begünstigt



wird diese Eliminierung, wenn bei der Rezeptierung des Beschichtungsstoffs Entschäumungshilfsmittel [64] verwendet wurden und ein guter Verlauf des Beschichtungsstoffs gegeben ist. Entschäumungshilfsmittel sind insbesondere bei wässrig formulierten Beschichtungsstoffen, speziell bei den Kunststoffdispersionen erforderlich, weil über die formulierungsbedingt notwendigen Netzmittel der blasenbildende Lufteintrag gefördert wird.

Erscheinung A in Bild 80 zeigt den Zustand, dass zwar die Oberflächenhaut noch durchbrochen worden ist, aufgrund des Viskositätsanstiegs ein vollständiger Verlauf jedoch nicht mehr möglich war. Erscheinung B zeigt dasjenige Stadium, in dem die Luftblase zwar noch die Oberfläche erreicht hat, wegen der fortgeschrittenen Filmbildung die Oberflächenhaut aber nicht mehr durchbrechen konnte. Erscheinung C zeigt eine im Film »eingefrorene«, kreisrunde Luftblase. Wegen der von Anfang an hohen Viskosität wurde sie am Aufsteigen gehindert. Sie besitzt auch nicht die abgeflachte Ellipsenform, die aus dem Wechselspiel von Auftrieb und Widerstand der Oberflächenhaut herrührt.

Ein blasenbildender **statischer Gasdruck** ist relativ selten. Er kommt aus dem Untergrund und wirkt auf die Beschichtung abhebend. Wenn z. B. zwei Räume mit unterschiedlichen Gas(Luft)drücken durch eine auf der Seite des niedrigen Drucks beschichtete Wand aus einem porösen Baustoff getrennt sind, können sich aus diesem Grund Blasen bilden. Wenn in Werksanlagen mit beschichteten Betonbauteilen sicherheitsrelevante Druckproben durchgeführt werden, sind an Wänden nach Ende des Versuchs nach erfolgtem Druckabbau in der Beschichtung Blasen beobachtet worden, weil der temporär im Porengefüge des Betons verbliebene Überdruck an Stellen geschwächten Haftverbunds, wie z. B. über Poren, die Beschichtung blasenartig abheben konnte.

Allzu oft wird die **thermische Ausdehnung eingeschlossener Gase** (auch Dampfdruck genannt) als Ursache von Blasen angesehen. In den Hohlräumen poröser Baustoffe kann theoretisch ein Überdruck auftreten, wenn das Entweichen der Gase während einer Temperaturerhöhung durch eine Beschichtung behindert wird. Im normalen Gebrauchsfall tritt das nicht ein, weil der Haftverbund zwischen Beschichtung und porösem Untergrund um Größenordnungen über dem Überdruck idealer Gase wie Luft oder Wasser liegt. Wenn Bläschen während der Beschichtungsphase auftreten, sind es überwiegend andere Ursachen (siehe Kapitel 3.6.3), über die nachgedacht werden muss.

Eine Blasenbildung durch Gasdruck wäre allerdings dann zu erwarten, wenn beim Erhitzen eines beschichteten Bauteils die Siedetemperatur eingeschlossenen Wassers überschritten würde (Prinzip Kochtopf). Solche Temperaturen treten im Bauwesen jedoch nicht auf.

Durch Einwirkung von Säuren auf Metalle erfolgt in aller Regel eine Wasserstoffentwicklung [88], die unter Umständen ebenfalls zu Blasen führen kann. Insbesondere in Deckbeschichtungen auf feuerverzinktem Stahl und auf Zinkstaub-Grundbeschichtungen kann diese Gasentwicklung zur Blasenbildung führen. Bild 87 zeigt eine im Coilverfahren verzinkte und beschichtete Panelwand, an der durch Säuredämpfe Blasen entstanden sind.

Durch Wärmeeinwirkung auf beschichtete Bauteile mit Temperaturen  $> 100^{\circ}\text{C}$  kann es als Folge einer thermischen Zersetzung von organischen Bindemittelbestandteilen zur Bildung von Gasen innerhalb einer Beschichtung oder an der Grenzfläche zum Untergrund kommen, mit der Folge der Blasenausbildung in der Beschichtung. Dieser Mechanismus wird bei Spezialbeschichtungen zum Brandschutz von Stahl und Holz [28] planmäßig zur Schaumschichtbildung genutzt. Bild 88 zeigt eine durch Blasenbildung geschädigte Korrosionsschutzbeschichtung aufgrund der thermischen Zersetzung des Bindemittels.

**Bild 87** ■ Auf einer im Coilverfahren verzinkten und beschichteten Stahlpanelwand sind bei einer unplanmäßigen Einwirkung von Salzsäuredämpfen nach Wasserstoffbildung in der Beschichtung Blasen entstanden und kurzfristig danach wieder zusammengefallen.



**Bild 88** ■ Blasen in der Alkyd-Korrosionsschutzbeschichtung an der Untersicht einer Stahlbrücke; nach oberseitiger Asphaltablagerung hat sich örtlich eine thermische Zersetzung des Bindemittels mit der Folge einer Gasblasenbildung eingestellt





Infolge eines hydrostatischen **Flüssigkeitsdrucks** können z. B. in sogenannten Druckrohren einer Wasserleitung aus Beton in einer außenseitigen Beschichtung Blasen erzwungen werden. Bei planmäßigem Haftverbund zwischen Beton und Beschichtungen führt dieser statische Wasserdruck jedoch allenfalls bei relativ weichen Beschichtungen zu Blasen. Bild 89 zeigt eine durch den hydrostatischen Druck des Grundwassers an der Innenseite eines Abwasser-sammelbeckens entstandene Blase an einer unzureichend haftenden Stelle der Epoxidbeschichtung.

Sehr große Blasen, unabhängig davon, ob sie mit einem Gas, einer Flüssigkeit oder einer festen Substanz gefüllt sind, bezeichnet man auch als **Beutel bzw. als Säcke**. Sie entstehen oft dadurch, dass sich an Wänden und Decken die relativ weiche und biegsame Beschichtung durch einen immer weiter um sich greifenden Haftverbundverlust als Folge der Unterwanderung immer mehr ablöst und schließlich Hohlräume unregelmäßiger Form entstehen. Ab einer



**Bild 89** ■ Mit Epoxidbeschichtung versehene Betonwand eines Abwasserbeckens ca. 6 m unterhalb des außenseitigen Grundwasserspiegels; planmäßig als WU-Beton erstellte Wanne hat kavernöse Zonen; an Stelle mit schwachem Haftverbund hat hydrostatischer Druck Enthaftung verursacht; durch Unterwanderung entstand eine Blase mit ca. 60 cm Durchmesser und einem Ausbeulungsstich von ca. 20 mm

bestimmten Größe der Hohlräume wird die von den abgelösten Beschichtungsteilen ausgehende Schwerkraftwirkung bestimmend für deren weitere Ausdehnung und Form. Bild 90 zeigt dies exemplarisch an der Polyurethanbeschichtung der Schaleninnenseite eines Kühlturms.

Da Blasen in unterschiedlichen Größen und Flächendichten auftreten, ist es zweckmäßig, neben der Entstehungsursache eine nähere quantifizierende Beschreibung des Blasengrads vorzunehmen [29]. Dabei wird sowohl die durchschnittliche Größe der Einzelblasen als auch die mittlere Anzahl der Blasen je Flächeneinheit erfasst.

Weil der Blasengrad nur die ›Ansicht‹, nicht aber den ›Querschnitt‹ einer Blase charakterisiert, sollte die Beschreibung ferner auch nach Inhalt und Form der Blasen, Tiefenlage des Hohlraums (innerhalb einer Einzelschicht, zwischen zwei Beschichtungslagen, zwischen Untergrund und erster Schicht etc.) und eventuell eine besondere gegenseitige Lage von Blasen (perlschnurartige Anordnung, Blasennester, Fingerabdruckspuren usw.) umfassen.

**Bild 90** ■ Flexibel formulierte Polyurethanbeschichtung, die sich unter geringem Druck, der Schwerkraft örtlich rückwärtig eingesickerten Wassers folgend, in der vorliegenden Form eines Blasensacks ausgebildet hat

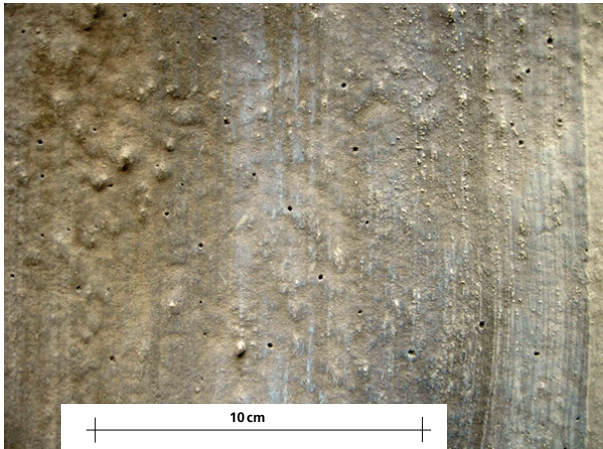


### 3.6.3 Pin holes – pin blisters

Eine häufig auftretende Blasenform, die der Erscheinung D in Bild 80 entspricht, soll an zwei Anwendungsbeispielen veranschaulicht werden. Man bezeichnet diese als **pin holes** bzw. als **pin blisters**. Weil sie stets in der Entstehungsphase einer Beschichtung aus dem Beschichtungsstoff heraus (siehe dazu auch Kapitel 2) auftreten, fügt man ihnen das Kürzel *in statu nascendi* hinzu.

## Beispiel pin holes

Auf der Schaleninnenseite eines Naturzugkühlturms musste großflächig mehrere cm dick Betonersatz mit Spritzmörtel (SPCC) ausgeführt werden [3], [27], [68]. Zur Herstellung einer beschichtungsgerechten Oberfläche ist anschließend PCC-Feinmörtel aufgezogen worden. Noch im quasi flüssigen Zustand dieser PCC-Feinmörtelschicht sind eine große Anzahl an pin holes entstanden, wie sie in Bild 91 ausschnittsweise gezeigt sind. Die nähere Untersuchung ergab, dass jedes pin hole im gesamten Querschnitt der PCC-Feinspachtelschicht vorlag, und dass sich in der darunter befindliche SPCC-Schicht eine kanülenartige Porenstruktur fortsetzte. Bei der anschließenden Beschichtung unter Verwendung lösemittelhaltiger bzw. wässrig basierter EP-Beschichtungsstoffe traten über jedem pin hole der PCC-Feinmörtelschicht auch wieder pin holes in der Beschichtung auf. Diesen Zustand zeigt Bild 92.



**Bild 91** ■ Pin holes (stecknadelkopfgroße Löcher) an der Oberfläche einer PCC-Mörtelschicht, die auf eine SPCC-Mörtelschicht appliziert worden ist



**Bild 92** ■ Pin holes an der Oberfläche einer EP-Beschichtung, die auf die PCC-Oberfläche gemäß Bild 91 appliziert worden ist

## Theoretischer Hintergrund

Betrachtet man das zweiphasige System von Flüssigwasser und Luft in einem offenen Behälter, dann stellt sich zwischen Wasser und der darüber angrenzenden Luft ein dynamisches Gleichgewicht ein. Die **Aktivität der Wassermoleküle** [85], eine thermodynamische Gesetzmäßigkeit, bewirkt, dass per saldo mehr Wassermoleküle aus der Flüssigkeit austreten, d.h. in die Luft hinein verdampfen und Gasform annehmen, als umgekehrt wieder zurück in die Flüssigkeit kondensieren. Wie viel Wasser von der Luft maximal aufgenommen werden kann, hängt von deren Energieinhalt, d.h. von der Lufttemperatur ab. So kann z. B. 20 °C warme Luft pro m<sup>3</sup> maximal 17,3 g Wasser in Dampfform aufnehmen. Würde man versuchen, mehr Wasser in diesem Volumen bei 20 °C unterzubringen, würde das überschüssige Wasser ausfallen (kondensieren) und als Nebel sichtbar werden. Diesen Zustand der maximalen Wasserdampfaufnahme nennt man Sättigungsfeuchte.

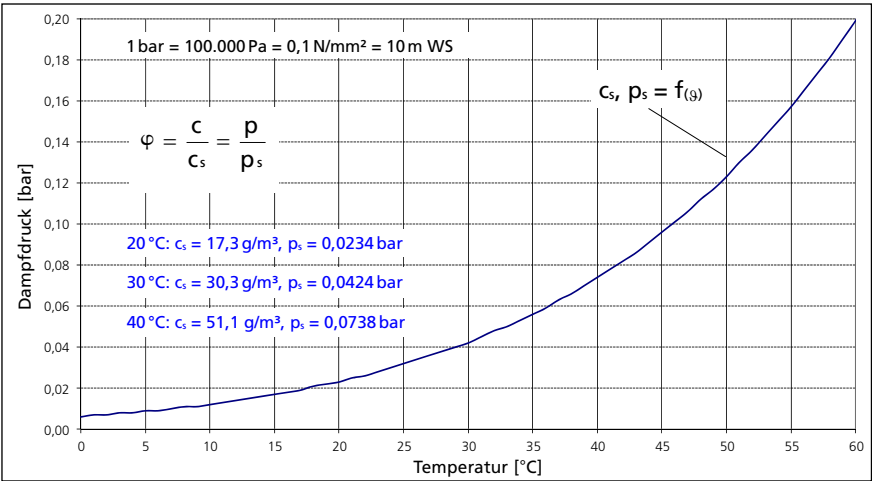
Die Erde ist mit einer mehr als 100 km hohen Luftschicht umhüllt, die aufgrund der Gravitation einen Druck auf die Erdoberfläche ausübt. Dieser wird als barometrischer Druck bezeichnet. Weil in dieser Luftschicht auch Wasserdampf enthalten ist, übt auch dieser wegen der Erdanziehung anteilig einen Druck auf die Erdoberfläche aus. Man nennt diesen den Partialdruck des Wassers. Damit ist der Zusammenhang zwischen der Konzentration des Wasserdampfs in der Luft in g/m<sup>3</sup> und dem Teildruck des Wasserdampfs in der Luft auf die Erdoberfläche in N/mm<sup>2</sup> bzw. in bar hergestellt.

Bild 93 zeigt in einer grafischen Darstellung die Kurve der Sättigungsfeuchte  $c_s$ /des Sattedampfdrucks  $p_s$  für Wasser als Funktion der Temperatur. Mit dem Symbol  $\varphi$  wird die relative Luftfeuchte dargestellt. Wie schon erwähnt, kann Luft bei 20 °C pro m<sup>3</sup> maximal 17,3 g Wasser in Dampfform aufnehmen. Diese Konzentration wird mit dem Symbol  $c_s$  erfasst. Daraus folgt z. B., dass Luft, die bei 20 °C nur 8,65 g Wasserdampf pro m<sup>3</sup> enthält, eine relative Feuchte von 0,5 oder 50 % besitzt.

Dieses Verhältnis zweier Konzentrationen kann auch als Verhältnis zweier Drücke formuliert werden, wenn man sich vorstellt, dass das Wasser in Dampfform unter dem Einfluss der Erdanziehung einen Druck auf die Erdoberfläche ausübt. Die relative Luftfeuchte  $\varphi$  lässt sich somit sowohl als Bezugsgröße zur **Sättigungsfeuchte** als auch zum **Sättigungsdruck** darstellen.

$$\varphi = \frac{c}{c_s} = \frac{p}{p_s} \quad [--] \quad (1)$$

Weil es sich dabei nur um einen Teil des Gases in der Erdhülle handelt, das Druck ausübt, spricht man vom Partialdruck. In dieser Konsequenz hat die Konzentration  $c_s = 17,3 \text{ g/m}^3$  einen anteiligen Druck von  $p_s = 0,0234 \text{ bar}$ . Ana-



**Bild 93** ■ Sättigungsfeuchte- bzw. Sattdampfdruckkurve für Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur

log dazu lassen sich die Zusammenhänge zwischen Konzentration von Wasserdampf in Luft sowie den Teildrücken aus der Sattdampfdruckkurve ableiten, insbesondere auch die Sättigungsfeuchten / Sättigungsdrücke für beliebige andere Temperaturniveaus.

Entstehung der pin holes

Unter baupraktischen Bedingungen stellt sich ein Druckaufbau in der Randzone des Bauteils (hier SPCC) wie folgt ein. Es wird vorausgesetzt, dass der Untergrund einzelne Porenöffnungen und randnah dahinter liegend, ein mehr oder weniger abgeschlossenes Porenvolumen (Kanülen, Kavernen, Lunker etc.) aufweist, wie das bei SPCC und auch bei Beton häufig anzutreffen ist:

Der Untergrund habe eine Temperatur von 20 °C, die über Stunden praktisch gleich bleibt. Wenn unter den klimatischen Randbedingungen in der Pore eine relative Luftfeuchte von 0 % vorläge, würde nach Applikation des PCC-Feinmörtels in diese Pore hinein Wasser verdampfen, bis sich in der Porenluft bei Unterstellung isochorer Bedingungen eine Wasserdampfkonzentration (Sättigungsfeuchte) von 17,3 g/m³ einstellt. Unter der weiteren Annahme, dass weder Luft noch Wasserdampf entweichen können, weil die Pore geschlossen ist, baut sich gegenüber dem atmosphärischen Druck ein Überdruck auf, der maximal 0,0234 bar betragen kann. Wenn der Überdruck größer wird als der Verformungswiderstand der noch flüssigen PCC-Schicht, wird diese vom Gas der Pore (Luft + Wasserdampf) durchbrochen und das Ergebnis ist ein pin hole.



Wenn bereits eine Anfangsfeuchte im Porenraum vorliegt, vermindert sich nach der Applikation der Zuwachs der Konzentration an Wasserdampf entsprechend und somit auch der Zuwachs an Überdruck, der ein pin hole erzwingen kann.

Wenn im randnahen Porenraum ein hoher Feuchtegehalt oder gar Flüssigwasser aus dem Vornässen vorliegt, wird nach dem Verschließen der Poren und dem Verdampfen des Wassers relativ schnell der Sättigungsdampfdruck erreicht, was die pin-hole-Bildung weiter fördert.

Thermodynamisch nimmt die Aktivität der Wassermoleküle, die vom flüssigen in den dampfförmigen Zustand übergehen, mit der Temperatur nicht linear, sondern überproportional zu. Dieses Verhalten wird in Bild 93 durch die nach oben gekrümmte Kurve dargestellt. Daraus folgt, dass mit Zunahme der Bauteiltemperatur und somit auch der Luft in den Poren die Überdrücke überproportional ansteigen und die Bildung von pin holes entsprechend zunimmt. Dabei ist zu beachten, dass dieser Vorgang nur für ein gewisses Zeitfenster gilt, in welchem der PCC-Feinmörtel eine bestimmte Konsistenz (niedriger Verformungswiderstand) aufweist. Auch für dieses Zeitfenster gilt, dass die erhöhte Temperatur praktisch konstant bleibt.

Aus der Gesetzmäßigkeit der Aktivität der Wassermoleküle erkennt man also, dass die Gefahr der Entstehung von pin holes bei höheren Temperaturniveaus des Bauteils (überproportional) höher ist, während sie bei niedrigen Temperaturniveaus entsprechend geringer ist. Baupraktisch folgt daraus, dass bei der Ausführung von Egalisierungs- und Beschichtungsmaßnahmen im Frühjahr bzw. im Herbst weniger mit diesen Störscheinungen zu rechnen ist als im Sommer.

Die beschriebenen Vorgänge gelten im Prinzip für alle vergleichbaren Werkstoffe mit verdampfbar Anteilen, also auch für Polymerbeschichtungsstoffe mit Lösemitteln oder temporär niedermolekularen Ausgangsstoffen. Analog zum Wasser besitzen auch diese Stoffe temperaturbezogen thermodynamische Aktivitäten, die stoffcharakterisierend als Sattdampfdrücke oder Sattdampfdruckkurven dargestellt werden können. Versuche dazu sind in [86] beschrieben.

Eine der häufigsten Fehleinschätzungen für die Entstehung von pin holes ist die Annahme, dass nach der Applikation von PCC-Feinmörtel eine Bauteilerwärmung stattfindet, z. B. zu Beginn eines Arbeitstages, und dass parallel dazu in Poren unterhalb des jeweils aufgetragenen Materials sich eingeschlossenes Gas (Luft) ebenfalls erwärme. Mit der Erwärmung käme es dann zum Druckanstieg in luftgefüllten Poren und zur Entstehung von pin holes.



Dass ein Druckanstieg im Porenraum zum pin hole führt, ist richtig, dass der Gasdruck in einer Pore unter isochoren Bedingungen proportional mit der Temperatur ansteigt, ist theoretisch auch richtig, jedoch ist Letzteres vorliegend im Regelfall nicht relevant. Nachweislich treten pin holes auch an beschatteten Bauteiloberflächen und auch in Zeiträumen ohne Temperaturänderung der angrenzenden Luft auf. Selbst wenn zu Beginn eines Tages die Lufttemperatur ansteigt, setzt wegen der Massigkeit des Betonbauteils keine spontane Bauteilerwärmung ein. Temperaturerhöhungen von 1 bis 2 °C stellen sich in Porenräumen nicht im Minutentakt, sondern erst nach mehreren Stunden ein. Beobachtungen während der Ausführungsphase haben ergeben, dass pin holes in der Zeitgrößenordnung von Minuten nach der Applikation entstehen, und nicht erst nach Stunden. Wird die Zeitgrößenordnung Minuten überschritten, haben Verfestigungsvorgänge den Werkstoff rheologisch soweit verändert, dass sein gesteigerter Verformungswiderstand keine pin-hole-Bildung mehr zulässt.

Wenn solche Abläufe bekannt sind, ist auch klar, dass es nicht hilfreich ist, die Applikation in die Phase des Temperaturabfalls gegen Ende eines Arbeitstages zu verlegen, wie dies u. a. auch in Technischen Merkblättern von Werkstoffherstellern empfohlen wird. Abgesehen davon, dass ein solcher Rat die Anwendung von Beschichtungen zum Erliegen bringen würde, müssten solche Arbeiten dann in die Nachstunden verlegt werden, weil in dieser Zeit im Freien die wirkungsvollste Temperaturabsenkung des Tagesverlaufs erfolgt.

### Vermeidung von pin holes

Maßnahmen zur Vermeidung können direkt aus den naturwissenschaftlichen Zusammenhängen für den Entstehungsmechanismus abgeleitet werden. Die größte Effizienz ist bei Beachtung der folgenden zwei Applikationsregeln zu erwarten:

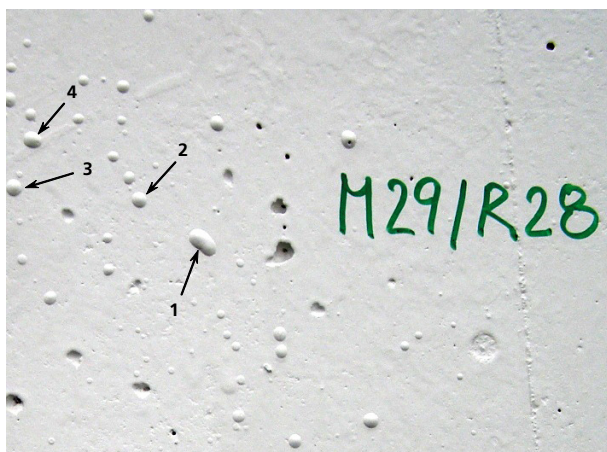
- a) Die Gesetzmäßigkeit der Aktivität der Wassermoleküle zeigt, dass die Gefahr der Entstehung von pin holes bei höheren Temperaturniveaus des Bauteils (überproportional) größer ist, während sie bei niedrigen Temperaturniveaus entsprechend geringer ist. Daraus folgt, dass bei der Ausführung von Egalisierungsmaßnahmen im Frühjahr bzw. im Herbst weniger mit diesen Störerscheinungen zu rechnen ist als im Sommer. Es soll noch mal erwähnt sein, dass dies nicht an steigenden oder fallenden Temperaturen, sondern am niedrigeren oder höheren jahreszeitbedingten Temperaturniveau des Betonbauteils liegt.
- b) Der Schlüssel zur Vermeidung von pin holes liegt jedoch in der Beschaffenheit der Werkstoffe und deren handwerklicher Anwendung. Betonuntergründe sollten vor einer Egalisierungsmaßnahme stets im Hochdruck-

wasserstrahl- bzw. im Druckluftstrahlverfahren mit festem Strahlmittel vorbereitet werden, um die Poren der Betonrandzone zu öffnen, damit sie zugänglich für Egalisierungsfeinmörtel sind. Ob auf Beton oder auf SPCC-Untergrund, in beiden Fällen entscheiden Konsistenz und Anwendungsvorgang des PCC-Feinmörtels darüber, ob es gelingt, eine ausreichend verdichtete Feinmörtelschicht zu schaffen, deren Verformungswiderstand auch im Anfangsstadium ausreichend groß ist, um dem oben beschriebenen Satttdampfdruck des eingeschlossenen Wasserdampfs zu widerstehen. Schlammversionen (hoher Wasserzementwert) können nicht ausreichend nachverdichtet werden und verhalten sich deutlich pin-hole-anfälliger als steifere PCC-Feinmörtel (niedriger Wasserzementwert), die händisch appliziert und durch Scheiben geglättet und dabei weiter verdichtet werden.

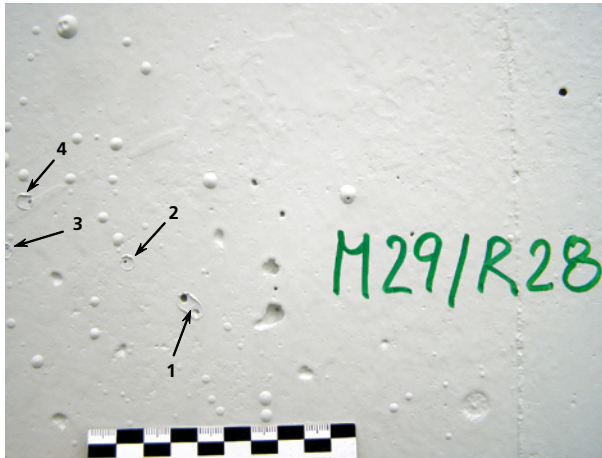
### Beispiel pin blisters

Auf der Schalenaußenseite eines in Kletterbauweise erstellten Neubau-Naturzugkühlturms aus Stahlbeton war die Außenseite mit einer optisch positiv wirkenden, hell pigmentierten Beschichtung zu versehen. Ansprüche an die Schutzwirkung waren nicht gestellt. Es ist eine regelwerkskonforme Maßnahme [3], bestehend aus Untergrundvorbereitung (HDW-Strahlen), Untergrundvorbehandlung durch hydrophobierende (siliziumorganische) Imprägnierung zur Auskleidung planmäßig akzeptierter Poren und eine zweilagige lösemittelbasierte Acrylbeschichtung zur Anwendung gelangt [87].

Während der Ausführung kam es immer wieder zur Bildung von Bläschen in der Acrylbeschichtung. Bild 94 zeigt einen Schalenausschnitt mit diesen Erscheinungen. Bild 95 zeigt den gleichen Schalenausschnitt, nachdem vier, bereits in Bild 94 markierte Bläschen aufgestochen worden sind. Man erkennt



**Bild 94** ■ Pin blisters an der Oberfläche einer lösemittelbasierten Acrylatbeschichtung auf Stahlbeton mit Oberflächenporen; die Blasen 1 bis 4 sind exemplarisch markiert



**Bild 95** ■ Öffnung der markierten pin blisters gemäß Bild 94; diese befinden sich stets über Oberflächenporen (pins) im Stahlbeton

in Bild 95, dass unter jedem Bläschen ein kleines Loch in der Betonschale vorliegt. Auf dem Blasengrund erkennt man die erste Lage der Beschichtung. Aus diesem Zusammentreffen von stecknadelgroßem Loch im Untergrund und der über dem Loch sich gebildeten Beschichtungsblase entstand die prägnante Bezeichnung pin blister.

### Entstehung der pin blisters

Bild 94 lässt erkennen, dass sich nicht über jeder Pore im Untergrund auch ein Bläschen bildet. Dies deutet darauf hin, dass pin blisters nur entstehen, wenn die Betonporen eine gewisse Beschaffenheit haben. Bild 95 zeigt, dass die Kanülen im Beton eher kleine Durchmesser haben. Neben diesem Merkmal gehört noch dazu, dass auch im Falle der pin blisters ein gewisses Hinterland an abgeschlossenem Porenvolumen (Kanülen, Kavernen, Lunker etc.) vorhanden sein muss. Dass dies so ist, haben zerstörende Prüfungen in randnahen Bereichen ergeben.

Grundsätzlich entstehen pin blisters auf der Basis derselben naturgesetzlichen Randbedingungen, wie sie von den pin holes bekannt und zuvor beschrieben worden sind. Zur Bildung von pin blisters ist es im gezeigten Fall aufgrund folgender Konstellation gekommen:

Die Ausführungsfirma hat unter normalen Witterungsbedingungen die erste Lage der Acrylbeschichtung im Rollenverfahren appliziert. Dabei ist der Beschichtungsstoff (planmäßig) nur unvollständig in die Poren eingedrungen. Nach einer ca. 24-stündigen Wartezeit wollte man die zweite Lage der Beschichtung applizieren. Es setzte jedoch ein Regenschauer ein und die Beschichtungsarbeiten mussten unterbrochen werden.

Danach hat man so lange gewartet, bis das Regenwasser abgetrocknet war. Dann ist die zweite Lage appliziert worden. In kurzem zeitlichem Abstand danach sind die in Bild 94 erkennbaren Bläschen entstanden. Dabei ist Folgendes passiert:

Das in die Poren eingelaufene Wasser war noch nicht wieder abgetrocknet. Wegen der hydrophobierenden Imprägnierung konnte sich das Regenwasser auch nicht kapillar weiter in den Zementstein hinein verteilen. Im Porenraum stand deshalb genügend Flüssigwasser, insbesondere dann, wenn das Hinterland des Porensystems genügend groß war. Nach dem Verschließen der Pore mit der Beschichtung baute sich wie oben beschrieben der Sättigungsdruck auf, der dann ein Bläschen erzwungen hat. Wegen des viskosen und zur Filmbildung besonders geeigneten lösemittelbasierten Beschichtungsstoffs platzte das Bläschen im Regelfall nicht auf, sondern expandierte so lange, bis sich Verformungswiderstand und Innendruck im Gleichgewicht befanden.

Nach den Untersuchungen gemäß [86] hätte auch der Lösemittelanteil der Beschichtung nach Verdampfen eines Restes in den Porenraum hinein einen bläschenerzwingenden Überdruck erzeugen können. Die Wahrscheinlichkeit, dass es das Regenwasser war, ist deutlich größer. Das ergibt sich schon daraus, dass sich in Trockenperioden, wenn überhaupt, dann nur deutlich weniger Bläschen eingestellt haben als nach dem besagten Regenereignis.

### Vermeiden von pin blisters

Im vorliegenden Fall war mit der Beschichtung eine Schutzfunktion nicht beabsichtigt, weshalb ein Porenverschluss als Vorbehandlungsmaßnahme nicht vorgesehen war. Weil einerseits die Oberflächenporen mittels einer hydrophobierenden Imprägnierung ausgekleidet und das Risiko der Hinterwanderung der Beschichtung dadurch planmäßig verringert worden ist und andererseits die pin blisters keine optische Beeinträchtigung darstellten und auch die Dauerhaftigkeit der Maßnahme dadurch nicht beeinträchtigt schien, trat das Problem der pin blisters im vorliegenden Fall in den Hintergrund. In anderen Fällen, in denen pin blisters nach dem Aufplatzen unvermeidbare Fehlstellen hinterlassen, ist diese Bewertung so nicht zulässig. Es kann dann eine pin-blister-Bildung nur dadurch verhindert werden, dass der Untergrund durch egalisierende und Poren konsequent verschließende Maßnahmen beschichtungsgerecht hergestellt wird (siehe auch Kapitel 2.5), ehe eine Schutzbeschichtung, z. B. gegen Carbonatisierungsfortschritt oder zwecks Rissüberbrückung, vorgenommen wird.

### 3.6.4 Schaumblasen

Gelegentlich stellt man im Querschnitt einer Beschichtung gehäuft viele kleine Bläschen gemäß Erscheinung E von Bild 80 fest, die der Schicht eine schaumige Struktur verleihen. Hierbei handelt es sich nicht um eingerührte Luft, denn diese tritt eher unregelmäßig und in geringerer Dichte auf. Wenn es sich um Polyurethanbeschichtungen handelt, die aus einem Zweikomponentenansatz stammen, dann geht die Entstehung meist darauf zurück, dass eine partiell hydrophil wirksame Isocyanat-Härterkomponente zum Einsatz gelangte, die im Gemisch mit der Polyol-Stammkomponente im flüssigen Zustand während der Applikation mit hoher Luftfeuchte oder gar Nebel, d. h. mit Wasser, in Berührung gekommen ist. Bei der dabei entstehenden chemischen Störreaktion von Isocyanat mit Wasser bildet sich eine Harnstoffstruktur und als unerwünschtes Nebenprodukt Kohlendioxid. Dieses liegt als Gas vor, expandiert den Beschichtungsfilm und hinterlässt eine schaumartige Beschichtungsstruktur.

Anhand von drei fotografischen Aufnahmen sollen dieser Vorgang und seine Folgen erläutert werden:

Bild 96 zeigt den Ausschnitt der Schaleninnenseite eines Kühlturms im oberen Bereich. Dort ist eine 2K-Polyurethan-Deckbeschichtung durch Airless-spritzen appliziert worden. Luvseitig (Südwest) zu diesem steht ein weiterer Kühlturm, der zu diesem Zeitpunkt im Betrieb war. Die Wetterlage war zur Applikation günstig. Böiger Wind trieb jedoch den Schwaden alternierend leeseitig über das Beschichtungsobjekt. Dort kam es wegen des erwärmten, wasserübersättigten Kühlturmschwadens (in dieser Konstellation ist dieser schwerer als die Luft im Kühlturm) zu Schwadeneinbrüchen. In Bild 96 sind diese als weiße, neblige Trübungen erkennbar. Die fallenden Kühlturmschwaden gelangten so in das Airless-spritzfeld der Applikateure, die diese ›Bedrohung‹ offensichtlich nicht realisierten.

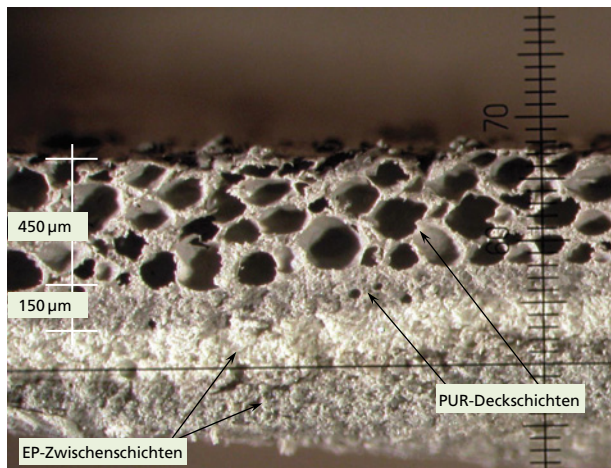
Auf einer Fläche von ca. 1.000 m<sup>2</sup> hat man anlässlich einer Kontrollbefahrung zwei Tage später den in Bild 97 gezeigten Schichtaufbau festgestellt. Die beiden EP-Zwischenschichten und die erste PUR-Deckschicht sind planmäßig und nahezu hohlraumfrei verfestigt. Die zweite Deckschicht hat eine ausgeprägte Schaumstruktur und ihre Schichtdicke ist etwa dreimal so hoch wie planmäßig zu erwarten (ohne Schaumbildung).

Die ausgeprägte Schaumbildung konnte dadurch entstehen, dass durch den Spritzstrahl in Form der feinen Tröpfchen des Beschichtungsstoffgemisches eine große Oberfläche zur Beaufschlagung durch das Wasser des nebelförmigen Kühlturmschwadens zur Verfügung stand.





**Bild 96** ■ Schaleninnenseite eines Kühlturms; Schwadeneinbrüche aus dem Betrieb des Nachbar-kühlturms beeinträchtigen Beschichtungsmaßnahmen

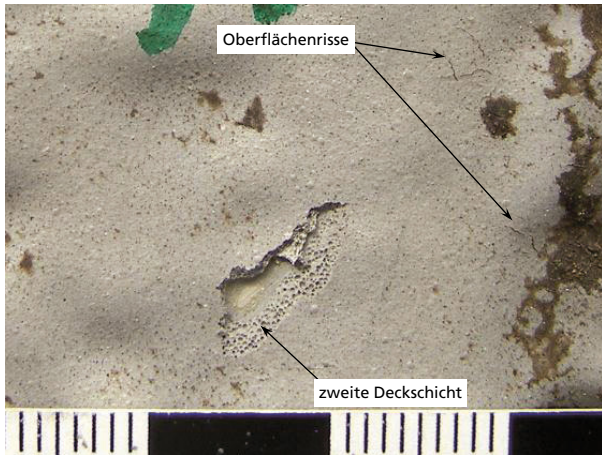


**Bild 97** ■ Schichtquerschnitt mit stark schaumiger zweiter PUR-Deckschicht

Bei dieser ausgeprägten Schaumbildung liegt die Annahme auf der Hand, dass die sonst bekannten Leistungsmerkmale der Polyurethanbeschichtung zum Schutz der Betonschale gegen die Betriebs- und Umgebungsbedingungen



nicht vorhanden sind. Bild 98 zeigt eine fotografische Aufnahme des betreffenden Schalenausschnitts nach zwei Jahren des Betriebs des Kühlturms. Die Untersuchung ergab, dass sich zahlreiche Oberflächenrisse in netzartiger Feinstruktur gebildet hatten. Diese gehen darauf zurück, dass, vorgegeben durch die Hohlraumstruktur und durch die wegen der Störreaktionen geschwächte Bindemittelmatrix, die Oberfläche netzartig aufgebrochen ist.



**Bild 98** ■ PUR-Deckschicht mit starker Schaumstruktur zeigt örtlich Oberflächenrisse nach zweijähriger Betriebsbeanspruchung

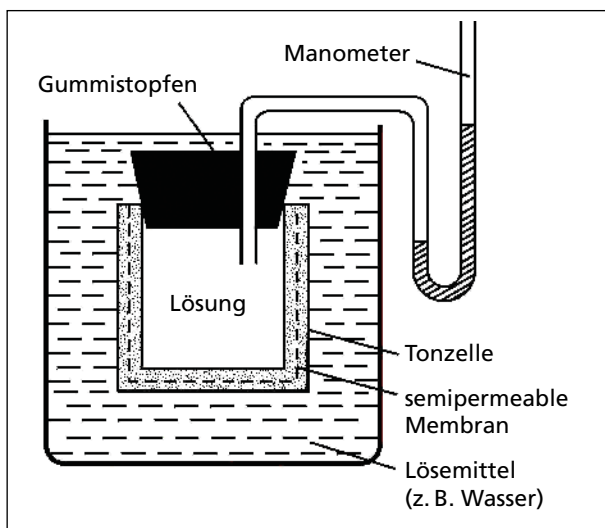
### 3.6.5 Osmotische Blasen

Die am weitesten verbreitete und auch am meisten gefürchtete Blase wird durch die Erscheinungen F und G in Bild 80 symbolisiert: Sie tritt erst nach der Verfestigung der Beschichtung auf. Ihre Entstehung geht auf deutlich höhere innere Überdrucke zurück, als sie unter Kapitel 3.6.3 beschrieben worden sind. An örtlich geschwächtem Haftverbund zum Untergrund bzw. zwischen den einzelnen Lagen eines Schichtaufbaus hebt der Überdruck gegen die Biegesteifigkeit der Deckschicht die Beschichtung an und erzwingt eine Blase. Die Beschreibung dieses Phänomens geht zurück auf eine intensive Experimentphase [90], welche auch die Basis der vorliegenden zweiten Buchauflage ist. In dieser Experimentphase sind zahlreiche Blasen von Polymerbeschichtungen auf mineralischen porösen sowie auf metallischen Untergründen eingehend untersucht sowie ihre flüssigen Inhalte analysiert worden. Bei den betreffenden Beschichtungen handelte es sich sowohl um physikalisch trocknende als auch um chemisch vernetzende Bindemitteltypen, wie sie unter Kapitel 2.3 beschrieben worden sind.

## Theoretischer Hintergrund

Die naturwissenschaftlichen Zusammenhänge der Osmose sind von Pfeffer [85] erstmals beschrieben worden. Den Nachweis führte er in einer Versuchsanordnung, die in Bild 99 gezeigt und nach ihm als Pfeffer'sche Zelle benannt ist: Das Kernstück ist ein Zylinder aus porösem, gebranntem Ton, der als Träger für eine semipermeable (halbdurchlässige) Membran dient. In diesen Tonzylinder hat er eine bestimmte Salzlösung eingefüllt und diesen Tonzylinder dann in eine andere Salzlösung getaucht. Die chemische Zusammensetzung der verschiedenen Salzlösungen hat er so gewählt, dass sich beim Aufeinandertreffen ein unlösliches Gel aus einer Eisencyanverbindung bildete. Dieses Gel hat sich dann im Querschnitt des Tonzylinders niedergeschlagen. Es hatte die Eigenschaft, Wassermoleküle leicht hindurchtreten zu lassen, während der Durchgang für andere Salzlösungen mit größeren Molekülen und Ionen versperrt war. Bildlich gesprochen hat sich dabei sozusagen eine Einbahnstraße für den Transport von Flüssigkeiten eingestellt, die man als semipermeable Membran bezeichnet.

Nacheinander füllte Pfeffer diesen Tonzylinder mit verschiedenen in Wasser gelösten Stoffen (Salzlösungen). Die Einfüllöffnung wurde druckdicht verschlossen. An den Zylinder war ein Quecksilbermanometer angeschlossen. Den Tonzylinder tauchte er dann in reines Wasser. Das Wasser drang – angetrieben vom Bestreben, die Salzlösung zu verdünnen – durch die semipermeable Membran in den Zylinder ein. Die dabei im Zylinder entstandene wässrige Lösung mit insgesamt geringerer Konzentration an löslichen Stoffen konnte jedoch auf gleichem Weg nicht wieder durch die Wand des Ton-



**Bild 99** ■ Pfeffer'sche Zelle zur Darstellung und zur Messung osmotischer Drücke

zylinders zurück, weil das die semipermeable Membran wegen der größer gewordenen Teilchen der Lösung verwehrte.

Die jetzt vorliegende neue Lösung beanspruchte jedoch einerseits ein größeres Volumen, andererseits waren die Wände des Tonzylinders nicht verformbar. Deshalb baute sich in der Lösung allmählich ein Druck auf, der am Manometer abgelesen werden konnte. Dieser Druck erschwerte jedoch auch das weitere Eindringen von Wassermolekülen. Beim Erreichen eines Gleichgewichts zwischen dem entstandenen Druck und dem Bestreben des Wassers, die Salzlösung im Tonzylinder weiter zu verdünnen, kam es dann zum Stillstand des Prozesses. Das erreichte Gleichgewicht zwischen einer wässrigen Lösung bestimmter Konzentration und dem Lösemittel (hier Wasser) korreliert mit einem ganz bestimmten Druck, den man als osmotischen Druck bezeichnet.

Die Aktivität (Beweglichkeit) der Wassermoleküle in einer Lösung ist umgekehrt proportional zur Konzentration des gelösten Stoffs. In Tabelle 10 sind für NaCl (Kochsalz) diejenigen osmotischen Drücke aufgeführt, die mit den genannten verschiedenen Konzentrationen der Salzlösung im Gleichgewicht stehen. Man erkennt, dass der osmotische Druck in guter Näherung linear mit der Salzkonzentration zu und mit der Aktivität der Wassermoleküle abnimmt. In Tabelle 11 sind analog osmotische Drücke anderer wasserlöslicher Stoffe zusammengestellt. In der Spalte ›bezogener osmotischer Druck‹ ist die ›Effektivität‹ der verschiedenen Stoffe, bezogen auf die Konzentration von 1 g/cm<sup>3</sup>, gezeigt.

**Tabelle 10** ■ Aktivität der Wassermoleküle und osmotischer Druck in Kochsalzlösungen variabler Konzentration

Konzentration der Kochsalzlösung		Aktivität der Wassermoleküle	osmotischer Druck
[g/Liter]	[Mol/Liter]	[%]	[N/mm²]
0	0	100	0,0
58	1	96	4,8
117	2	93	10,3
175	3	89	16,8
234	4	85	23,4
292	5	81	30,0
351	6	77	36,6
370	6,3	75	38,0
(gesättigt)			

**Tabelle 11** ■ Osmotischer Druck verschiedener wasserlöslicher Substanzen

in Wasser gelöster Stoff	Konzentration c	osmotischer Druck $\pi$	bezogener osmotischer Druck $\pi/c$
	g/cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N · cm <sup>3</sup> /g · mm <sup>2</sup>
Methanol	0,230	26,0	113
Äthanol	0,268	25,0	94
Äthylenglykol	0,377	26,5	71
Propylenglykol	0,100	3,8	38
Glyzerin	0,440	22,0	50
Zitronensäure	0,340	6,0	17
Ameisensäure	0,437	25,5	61
Kaliumphthalat	0,083	1,9	23
Salzsäure	0,127	27,0	212
Schwefelsäure	0,281	26,5	94
Phosphorsäure	0,470	28,0	60
Salzsäure	0,160	23,0	144
Schwefelsäure	0,052	4,8	93
Phosphorsäure	0,114	23,0	202
Kochsalz	0,311	32,0	103
Glaubersalz	0,063	2,1	33
Soda	0,063	3,0	48
Kaliumchromat	0,234	6,4	27
Eisenchlorid	0,236	22,5	95
Magnesiumsulfat	0,188	5,2	28
Zinksulfat	0,189	3,4	18
Kupfersulfat	0,161	2,4	15

Wassermoleküle können semipermeable Membranen nur im Gefälle ihrer Aktivität passieren. Ist reines Wasser durch eine semipermeable Membran von einer Kochsalzlösung getrennt, so wandern die Wassermoleküle stets vom reinen Wasser zur Lösung, denn so zeigt es die Auflistung in Tabelle 10, die Aktivität von reinem Wasser beträgt 100 %, während sie mit zunehmender Salzbefrachtung bis zur höchsten Sättigung auf 75 % abfällt. Beim Angleichen der Aktivitäten geht auch das Durchdringen der semipermeablen Membran zu Ende.

## Entstehung osmotischer Blasen

Beschichtungen auf Bindemittelbasis organischer Polymere können als semipermeable Membranen wirken. Sie können von Wassermolekülen auf dem Wege der Diffusion durchdrungen werden, nicht aber von den Lösungen der Ionen und den größeren Molekülen. Die größte osmotische Wirkung auf eine Beschichtung liegt dann vor, wenn eine wässrige Umgebung mit hoher

Aktivität der Wassermoleküle gegeben ist. D. h., wenn eine Beschichtung in einem Regenwasserbehälter vorliegt, treten eher osmotische Blasen auf, als wenn dieser Behälter mit Meerwasser gefüllt ist.

Die Tatsache, dass osmotische Blasen vorzugsweise bei Unterwasserbeschichtungen und bei Beschichtungen auftreten, die häufig durch Wasser oder durch Wasserdampf bzw. sehr feuchte Luft beansprucht werden, zeigt, dass eine hohe Aktivität der Wassermoleküle eine wichtige Bedingung für die Entstehung ist. Dass dann osmotische Drücke im Blaseninneren vorliegen, kann beim Anstechen der Blasen festgestellt werden. Abhängig vom Stadium der Entstehung entweicht die Blasenflüssigkeit zum Teil unter heftigem Druck.

Wenn es gelingt, den Blaseninhalt zu gewinnen, kann durch Analyse festgestellt werden, welche wasserlöslichen Stoffe – auch Blasenkeime genannt – zur Blasenbildung geführt haben. Auf zementgebundenen Untergründen ist der Blaseninhalt in der Regel stark basisch, was allein schon auf die Anwesenheit gelöster Stoffe hinweist. Die Analyse zeigt ferner, dass diese Basizität von Natrium- und Kaliumverbindungen des Betons, selten dagegen oder nur in geringer Menge von Calcium- und Magnesiumverbindungen, verursacht wird. Dies liegt daran, dass die Alkalimetalle (K, Na) deutlich stärker dissoziieren als die Erdalkalimetalle (Ca, Mg), obwohl Letztere im Zementstein in größerer Konzentration vorliegen. Häufig stellt man bereits bei der Geruchsprobe fest, dass Lösemittel, und bei 2K-Beschichtungen oft auch Härterbestandteile, in der Blasenflüssigkeit vorliegen. Mit dem Begriff Blasenkeim bezeichnet man die Ansammlung wasserlöslicher Stoffe in oder unter einer Beschichtung. Der von der Aktivität der Wassermoleküle bestimmte Drang, die Konzentration der wasserlöslichen Stoffe abzubauen, ist der Motor zur Blasenbildung.

Wenn die Hohlräume von Blasen nahe der Grenzfläche zwischen einem porösen Untergrund und einer Beschichtung liegen, muss angenommen werden, dass die Poren des Untergrunds durch eingedrungene Beschichtungsstoffbestandteile verstopft wurden (analog zu dem ausgefallten Gel der Pfeffer'schen Tonzelle). Grundierungen mit reinem Bindemittel sind diesbezüglich besonders wirkungsvoll.

Beschichtungen auf porösen Untergründen (Beton, Zementputz usw.) können das Wasser zum Füllen osmotischer Blasen sowohl aus dem Untergrund als auch von der Nutzseite her oder aus beiden Richtungen aufnehmen. Bei Metallbeschichtungen wird Wasser natürlich nur von der Oberfläche her aufgenommen. Das bedeutet, dass Polymerschichten sowohl am oberen als auch am unteren Rand eines Beschichtungsaufbaus als semipermeable Membranen auftreten. Dass sie grundsätzlich für Wasser bzw. Wasserdampf diffundierbar sind, ist in zahlreichen Untersuchungen belegt [66], [91].

Entstehung und Wachstum einer Blase wird natürlich durch den Haftverbund zum Untergrund bzw. durch die Haftung zwischen zwei Lagen des Beschichtungssystems (Adhäsion) und durch den internen Verbund einer Beschichtungslage (Kohäsion) bestimmt bzw. beeinflusst. Darüber hinaus ist der Verformungswiderstand, d. h. die Biegesteifigkeit der Beschichtung, von signifikanter Bedeutung. Adhäsionsverbund, Kohäsionsverbund und Verformungswiderstand von Polymerbeschichtungen unterliegen einerseits stoffimmanenten Vorgaben. Andererseits sind sie hinsichtlich ihrer physikalischen/mechanischen Konstanz abhängig von hygrischen (z. B. Nasshaftung) und thermischen Einflüssen (plastomere Verformungsanteile). Das bedeutet, dass die quellungsbedingte bzw. die erwärmungsbedingte Absenkung des Haftverbunds und der Biegesteifigkeit begünstigend auf den Ablauf osmotisch generierter Blasenbildung wirken und natürlich auch umgekehrt.

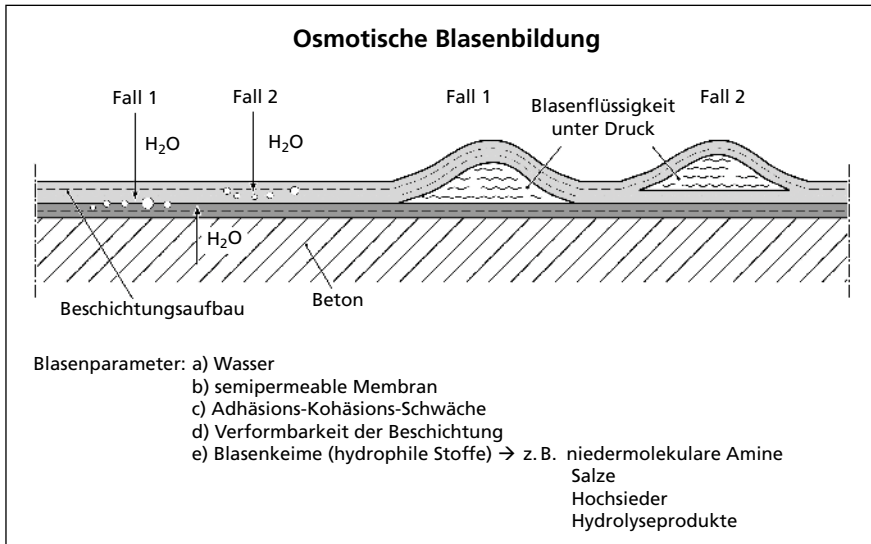
Die Angaben zu den osmotischen Drücken in den Tabellen 10 und 11 zeigen, dass sehr hohe Werte des Haftverbunds bzw. der Biegesteifigkeit einer Beschichtung erforderlich wären, um auch relativ kleine Aktivitätsdifferenzen unwirksam werden zu lassen. Man kann aber auch davon ausgehen, dass der Haftverbund intern (Kohäsion) und zwischen Einzellagen und zum Untergrund (Adhäsion) nicht an jeder Stelle optimal hoch ist. Bei Haftzugversuchen mit der Stempelmethode wird der Verbund einer knapp 2.000 mm<sup>2</sup> großen Fläche integrativ ermittelt. Tatsächlich liegen dann auch Kleinflächen mit deutlich niedrigerer Verbundfestigkeit vor, die potenziell Ausgang einer osmotisch erwirkten Blasenentstehung sein können.

In Bild 100 ist modellhaft dargestellt, welche vom Schichtaufbau abhängigen Blasen (Fall 1/Fall 2) hauptsächlich vorkommen und welche Parameter zur Entstehung beitragen bzw. diese bestimmen. Nach den vorausgegangenen Beschreibungen kann die Osmose verhindert werden, wenn einer der fünf Parameter konsequent ausgeschaltet wird.

Dazu muss festgehalten werden:

- **Wasser** ist beim Betonbauwerk/Bauteil konstruktionsbedingt nachhaltig und anlagentechnisch manchmal nutzungsimmanent.
- In den bautenschutztechnisch üblichen Schichtdicken sind Polymerbeschichtungen für Wasser stets diffundierbar und unter der funktionalen Voraussetzung des geschlossenen Gefüges **semipermeabel**.
- **Adhäsions- bzw. Kohäsionsschwächen** sind einerseits hauptsächlich rezeptierungsbedingt. Eine ausreichende Optimierung kann aber auch an der Begrenzung des kommerziellen Aufwands zur Erfüllung scheitern.
- Wenn entsprechende Beschichtungen funktionsabhängig rissüberbrückende Eigenschaften aufweisen müssen, ist der Parameter des hohen **Verformungswiderstands** per se nicht einhaltbar.



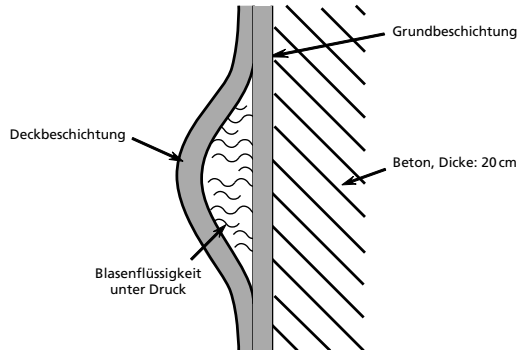


**Bild 100** ■ Modellhafte Darstellung der osmotischen Generierung von Blasen in Polymer-Beschichtungsaufbauten

- Gegen die totale Vermeidung von **Blasenkeimen** spricht einerseits die Tatsache, dass Komponenten und Additive der Beschichtungsstoffe aus technischer Sicht, aus Gründen der Verfügbarkeit und aus kommerziellen Gründen nicht blasenkeimfrei herstellbar sind. Andererseits befördern die baupraktischen Bedingungen zur Applikation von Beschichtungssystemen allzu oft die Entstehung von Blasenkeimen mehr als akzeptabel.

Anhand von drei Fallbeispielen mit Unterschieden im Systemaufbau und verschiedenen Objektanordnungen (vertikal, horizontal) soll die osmotisch generierte Blase in Beschichtungsaufbauten mit Praxisbezug dargestellt werden. Die Bilder 101, 102 und 103 zeigen schematisch die Systemaufbauten.

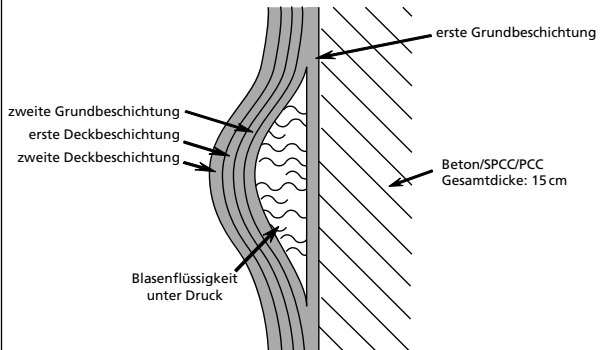
### Fallbeispiel 1: Adhäsionsblase Wand



#### Bild 101 ■

Systemaufbau:  
 Glatt geschalter Beton  
 EP-Grundbeschichtung  
 $s_{\min} = 100 \mu\text{m}$   
 EP-Deckbeschichtung  
 $s_{\min} = 200 \mu\text{m}$

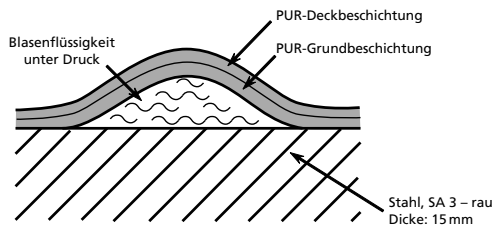
### Fallbeispiel 2: Kohäsionsblase Wand



#### Bild 102 ■

Systemaufbau:  
 Beton / SPCC / PCC  
 feinrau-verrundet  
 1. EP ZB, wasserbasiert,  
 $s_{\min} = 75 \mu\text{m}$   
 2. EP ZB, wasserbasiert,  
 $s_{\min} = 75 \mu\text{m}$   
 1. PUR DB, lösemittel-  
 basiert,  
 $s_{\min} = 75 \mu\text{m}$   
 2. PUR DB, lösemittel-  
 basiert,  
 $s_{\min} = 75 \mu\text{m}$

### Fallbeispiel 3: Adhäsionsblase Boden



#### Bild 103 ■

Systemaufbau:  
 Stahl 15 mm dick  
 PUR-Grundbeschichtung,  
 $s_{\text{mit}} = 100 \mu\text{m}$   
 PUR-Deckbeschichtung,  
 $s_{\text{mit}} = 150 \mu\text{m}$

## Fallbeispiel 1

Bild 104 zeigt einen Ausschnitt von sogenannten Kühlleistungseinbauten eines Naturzugkühlturms mit Abgaseinleitung. Weil die Stahlbetonbalken und Riegel oberhalb der Wasserverteilungsebene angeordnet sind, war eine Schutzbeschichtung gegen die Beanspruchung durch Abgas-Schwadenkondensat vorzusehen [27]. Bereits im Fertigteilwerk sind die glatt geschalteten Bauteiloberflächen nach minimaler Vorbereitung mit einer lösemittelbasierter EP-Grundbeschichtung versehen worden. Darauf wurde eine pigmentierte, lösemittelbasierte EP-Deckbeschichtung in einer planmäßig vorgesehenen Mindestschichtdicke von 200 µm im Airlessverfahren appliziert. Die danach anschließende Betriebsbeanspruchung bestand aus der permanenten Verrieselung mit Wasser von  $30 \pm 5^\circ\text{C}$  und der direkten Beaufschlagung des Spritz- und Kondensatwassers auf die wie oben beschrieben beschichteten Bauteilflächen.

Etwa zwei Jahre danach ergab sich die erste Möglichkeit des Zugangs und der Inaugenscheinnahme der Bauteiloberflächen. An den vorzugsweise vertikalen Flächen hatten sich in der Beschichtung Blasen in großer Flächendichte eingestellt. Bild 105 zeigt den Ausschnitt einer Teilfläche eines so beanspruchten Balkens. Einige der Blasen waren aufgeplatzt, viele waren ganz bzw. teilweise eingefallen. Soweit noch erkennbar geschlossene Blasen vorhanden waren, waren diese mit einer klaren Flüssigkeit gefüllt. Die Flüssigkeit besaß einen pH Wert von ca. 12. Die Flüssigkeit roch signifikant nach ›Chemie‹. Überschläglich konnten durch Geruch Lösemittel und Amine identifiziert werden. Auffallend war, dass der Blasenhohlraum genau zwischen Grundbeschichtung (auf dem Untergrund festhaftend) und pigmentierter Deckschicht aufgetreten war, d. h. im Wege eines Adhäsionsbruchs. Des Weiteren war auffallend, dass die Grundbeschichtung erkennbar ohne Fehlstellen und Poren aber relativ geschlossen war. Dies wiederum lässt den Schluss zu, dass Fall 1 der Modelldarstellung gemäß Bild 100 vorliegt. Daraus kann abgeleitet werden, dass sowohl die Grundbeschichtung als auch die Deckbeschichtung die Funktion der semipermeablen Membran übernommen haben konnten (Bild 101). Aufgrund des Temperatur- und Feuchtmilieus lag es nahe, dass die Deckbeschichtung eher als semipermeable Membran fungiert hat. Neben diesen klimatisch osmosefördernden Fakten haben mit Sicherheit die glatte Oberfläche der Grundbeschichtung und der damit im Zusammenhang stehende schwache Haftverbund mit der Deckbeschichtung eine wesentliche Versagensrolle gespielt.

**Bild 104** ■ Stahlbeton-Tragkonstruktion der Rieseleinbauten eines Naturzugkühlturms.



**Bild 105** ■ Osmotische Blasen in der EP-Beschichtung der Beton-Tragkonstruktion; Blasenhohlraum liegt zwischen Grund- und Deckbeschichtung; Haftverbund ist wegen dickschichtiger und sehr glatter Grundbeschichtung mäßig; Blasen sind nach Trocknung partiell zusammengefallen



## Fallbeispiel 2

Im zweiten Fallbeispiel handelt es sich um die Schaleninnenseite eines Naturzugkühlturms mit Abgaseinleitung. Nach intensiver Betriebsbeanspruchung [67] ist örtlich mehrere Zentimeter tief Beton abgetragen worden. Der Ertüchtigungsaufbau bestand aus einer HDW-Untergrundvorbereitung, einer SPCC-Auffütterung des fehlenden Betonprofils und einer Untergrundvorbehandlung durch PCC-Feinmörtel zur Schaffung eines beschichtungsgerechten Untergrunds. Darauf ist ein vierlagiges Polymerbeschichtungssystem, bestehend aus je zwei Lagen einer wasserbasierten EP-Zwischenbeschichtung und einer lösemittelbasierten PUR-Deckbeschichtung, appliziert worden.

Aus der kombinierten Beaufschlagung aus Kühlleistungsschwaden und partiell gereinigtem Abgas resultierte an der Beschichtungsoberfläche im permanenten Betrieb eine planmäßig übersättigte Feuchteeinwirkung (Kondensat) von bis zu 35 °C.

Zwei Jahre nach Betriebsstart folgte eine Revision am Kraftwerk. Anlässlich der Befahrung der Schaleninnenseite über Seilfahranlagen mit Hängekorb sind zahlreiche Blasen festgestellt worden. Bild 106 zeigt einen Ausschnitt der Schalenoberfläche. Alle Blasen waren flüssigkeitsgefüllt und standen unter einem leichten Überdruck. Der Hohlraum lag als Kohäsionsblase vor, d. h. der Bruch war nicht zwischen zwei Einzellagen, sondern in der ersten Lage der EP-Zwischenschicht aufgetreten. Diese Kohäsionsbruchebene lässt sich aus Bild 107 erkennen. Es handelt sich dabei um den Querschnitt, der über eine Bohrkernentnahme aus einem einer Einzelblase benachbarten Bereich gewonnen worden ist. Die in der ersten Lage erkennbaren Parallelrissansätze zeichnen den Kohäsionsbruch vor.

Bild 108 zeigt im Querschnitt des Schichtaufbaus einen Teil des Blasenhohlraums. Er ist identisch mit der schematischen Querschnittsdarstellung von Bild 102. Der am Untergrund anhaftende Teil der Beschichtung hat eine Schichtdicke von ca. 250 µm, der an der zweiten EP-Zwischenschicht verbliebene Teil war ca. 100 µm dick. In der Blasenflüssigkeit wurden zahlreiche wasserlösliche Substanzen gefunden. Die Symptome lassen den Schluss zu, dass der Fall 2 der Modellbetrachtung gemäß Bild 100 vorliegt. Als semipermeable Membran ist die am Untergrund haftende Teilschicht der ersten EP-Zwischenschicht anzunehmen. Im SPCC ist ein Wassergehalt von 6 Masse-% festgestellt worden.

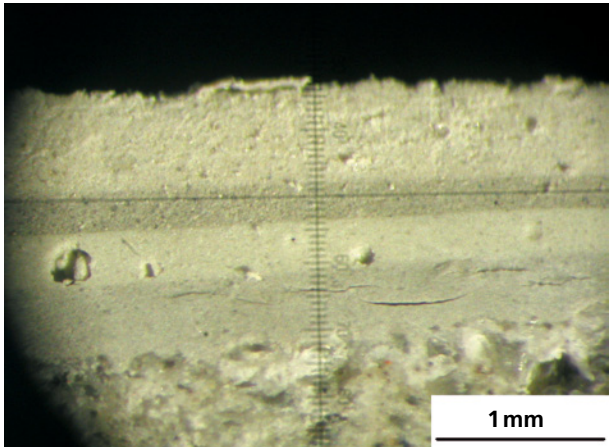
Eine signifikante Begünstigung wird der offensichtlich geschwächten Kohäsionsfestigkeit der ersten EP-Zwischenschicht im Bereich zur zweiten EP-Zwischenschicht zugeschrieben. Naheliegender wäre, dass es nach Applikation des wasserbasierten 2K-Beschichtungsstoffs als Folge einer zu hohen relativen Luftfeuchte wegen der dadurch verursachten Wasserretention zu einer Behinderung des Austrocknens und dadurch zu einer unvollständigen Vernetzung gekommen ist. Eine weitere Kohäsionsschwächung könnte auch durch eine Netzmittelanreicherung im Zuge des zur Oberfläche gerichteten Massenstroms an Wasser bei der Trocknung in der besagten Zone begünstigt worden sein. Dadurch wird der Quellungszustand innerhalb der EP-Zwischenbeschichtung aufrechterhalten. Schließlich zeigte die Statusaufnahme, dass im Bereich der größten Blasendichte der Schaleninnenseite die Wahrscheinlichkeit des Wärmeeinflusses im Zusammenhang mit der Abgaseinleitung am größten ist.



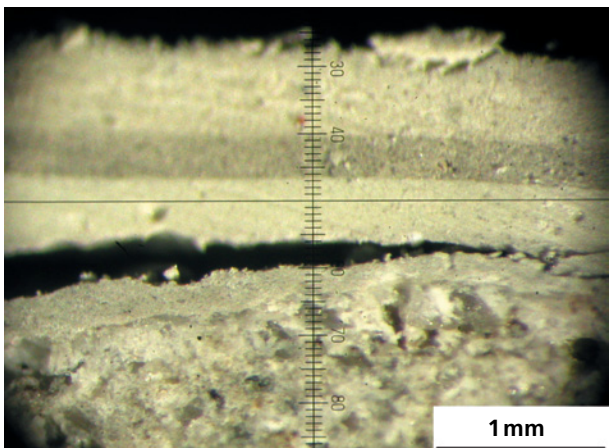
**Bild 106** ■ Osmotische Blasen in der EP-Beschichtung der Schaleninnenseite eines Naturzugkühlturms; Systemaufbau: Stahlbetonschale + SPCC-/PCC-Reprofilierung + zwei Lagen EP-Zwischenschicht (wasserbasiert) + zwei Lagen PUR-Deckschicht (lösemittelbasiert)



**Bild 107** ■ Querschnitt des Polymer-Beschichtungsaufbaus Fallbeispiel 2; Stadium 1: Parallelrisse im oberen Drittel der ersten Lage der EP-Zwischenschicht wegen einer Kohäsionsschwäche



**Bild 108** ■ Querschnitt des Polymer-Beschichtungsaufbaus gemäß Bild 107; Stadium 2: Erzwingung eines osmotisch generierten Blasen Hohlrums in der kohäsionsgeschwächten ersten Lage der EP-Zwischenschicht





Somit hätten die Mechanismen Quellung und unzureichende Vernetzung eine Kohäsionsschwäche und die besondere Wärmeeinwirkung die Verformbarkeit der Polymerbeschichtung besonders befördert. Die osmotisch generierte Diffusion von Wasser aus dem Potenzial der SPCC-Schicht durch die als semipermeable Membran wirkende Restschicht der EP-Zwischenbeschichtung konnte dann bereits beim Aufbau eines geringen osmotischen Drucks in der ersten EP-Zwischenschicht Blasen erzwingen.

Zwar lag an der Oberfläche der zweiten PUR-Deckschicht genügend Wasser an, jedoch kann man davon ausgehen, dass über das oberhalb der Kohäsionsschwäche befindliche Schichtenpaket wegen des hohen Wasserdampfdiffusionswiderstands kein merklicher Beitrag zur Blasenbildung geleistet wurde.

### Fallbeispiel 3

Die Innenseite einer kugelähnlichen sogenannten Kondensationskammer eines Siedewasser-Kernkraftwerks, die als Stahlblechhülle erbaut worden ist, war mit einer Korrosionsschutzbeschichtung zu versehen. Der Behälter wird bis in eine bestimmte Höhe mit voll entsalztem Wasser (Aktivität der Wassermoleküle = 1) befüllt, welches im Normalfall Normaltemperatur und im Notfall temporär eine deutlich erhöhte Temperatur annimmt. Versuche haben ergeben, dass ein bestimmtes, lösemittelbasiertes, starr formuliertes Polyurethan-Beschichtungssystem die größte Resistenz gegen die Bildung osmotischer Blasen aufweist. Die gesamte Innenseite der Stahlhülle ist im Druckluft-Strahlverfahren mit festem Strahlmittel bis zum Reinheitsgrad SA 3 vorbereitet worden. Der Polyurethan-Beschichtungsstoff ist im Airless-spritzverfahren mehrlagig in einer Gesamtschichtdicke von 300 µm appliziert worden.

Nach einer Probelaufzeit von mehreren Monaten wurde die Innenseite der Kondensationskammer nach Ablassen des Wassers inspiziert. Dabei konnten insbesondere am Torusboden und abnehmend auf einer der Kugelform der Kammer nach oben verlaufenden Fläche Blasen im Durchmesser von maximal 20 mm ermittelt werden. Sie waren flüssigkeitsgefüllt und standen unter Überdruck, was sich beim Anstechen feststellen ließ. Der Hohlraum lag als Adhäsionsblase mit Bruch zwischen Stahlhülle und Polymerbeschichtung vor (Bild 103). Auf der Stahlhülle befanden sich in geringem Umfang Korrosionsprodukte.

Die Analyse des Blaseninhalts ergab das Vorhandensein lacktechnologisch gängiger, wassermischbarer Lösemittel (z. B. Ketone, Alkohole) in geringen Mengen. Außerdem konnte signifikant NaCl detektiert werden.

Parallel wurden Recherchen über die besonderen Bedingungen der Beschichtungsanwendung eingeholt. Dabei konnte ermittelt werden, dass die Sandstrahlarbeiten zuerst am Torusboden und in den daran anschließenden Rundungen zum Kugelprofil der Kammer und danach beginnend von oben nach unten (vertikal gesehen) vorgenommen wurden. Am Ende der Vorbereitung sind das Strahlmittel und der Sekundärabfall ausgeräumt worden. Die Beschichtung erfolgte dann von oben nach unten (vertikal gesehen).

Insgesamt konnte konstatiert werden, dass Untergrundvorbereitung und Beschichtung nicht unter ›Reinraumbedingungen‹ vorgenommen worden sind.

Es sind Stahlplatten-Versuchskörper hergestellt worden. Diese wurden im ›Sandstrahlverfahren‹ bis zum Reinheitsgrad SA 3 vorbereitet. Auf jeweils einer durch Koordinaten genau definierten Teilfläche erfolgte eine Kontamination der Stahlplatten mit NaCl, Schweiß und Urin. Die Recherchen haben ergeben, dass während der Ausführung der Beschichtungsmaßnahmen in dem im radioaktiven Kontrollbereich liegenden Kammersystem relativ hohe Temperaturen (wenigstens 30 °C) herrschten und keine Klimatisierung vorgenommen worden ist. Die sanitären Räume waren anlagenbedingt nur über lange Wege erreichbar, sodass die Notdurft vor Ort verrichtet wurde. Deshalb die Einbeziehung der Stoffwechselendprodukte.

Analog zur in-situ-Anwendung ist auf den Versuchsplatten ein mehrlagiger Auftrag des PUR-Beschichtungssystems in einer Trockenschichtdicke von 300 µm erfolgt.

Die Probekörper wurden dann in vollentsalztes Wasser bei 35 °C eingehängt. Spätestens nach zwei Wochen hatten sich an allen kontaminierten Stellen der Probekörper in der Beschichtung Blasen gebildet. Die Blasen waren flüssigkeitsgefüllt und standen unter Überdruck und es waren Adhäsionsblasen zwischen Stahl und Beschichtung (analog Bild 103).

Alle Parameter gemäß Bild 100 werden erfüllt. Als semipermeable Membran ist ausschließlich die Deckbeschichtung verfügbar. Vollentsalztes Wasser mit der höchstmöglichen Aktivität der Wassermoleküle ist hocheffizient. Die Blasenkeime sind definiert und man kann davon ausgehen, dass sie als Hauptverursacher auf den vorliegenden Fall übertragen werden konnten.

Die Konsequenz aus diesem Fallbeispiel 3 lautet, dass bei der Untergrundvorbereitung von Stahl insbesondere dann, wenn als Betriebsmedium vollentsalztes Wasser vorliegt, eine gründliche Beseitigung von Korrosionsprodukten und löslichen Kontaminationen erforderlich wird, weil sonst der Aktivitätsabstand zwischen Wasser und Blasenkeim potenziell hochgradig osmotisch wirkt.

Banale Verunreinigungen wie die Salzkontamination durch Fingerabdrücke, Schweißtropfen und weitere Substanzen mit ›verlässlicher Wirkung‹ erfordern bei Planung und Ausführungsüberwachung [68] höchste Ansprüche an Steuerung und Kontrolle des Arbeitsablaufs.

### 3.6.6 Kapillardruckinduzierte Blasen

Bereits in den Anfängen bautenschutztechnischer Bewertungen wurden Überlegungen zu einem möglichen Kapillardruck in porösen Baustoffen angestellt [90], nach denen an durch Beschichtung verschlossenen Enden von Kapillarporen von im Wasser stehenden Bauteilen so große Drücke infolge komprimierter Luft entstehen, dass sich Blasen einstellen können.

Diese Überlegung bedarf einer differenzierten Anwendung. Sie basiert stets auf der theoretischen Ausgangslage, dass die Steighöhe in einer röhrenförmigen Kapillare mit kreisförmigem Querschnitt, neben einigen weiteren Parametern, umgekehrt proportional zum Durchmesser der Kapillare verläuft.

Der häufig im Zusammenhang mit Blasen in Beschichtungen betrachtete Baustoff Beton hat die kreisrunden Querschnitte definitiv jedoch nicht. Somit sind auch die aus dieser Beziehung zwischen Steighöhe und Durchmesser des Porenradius abgeleiteten Kapillardrücke hinsichtlich der Verursachung von Blasen in Betonbeschichtungen diskussionsfähig.

In Laborversuchen [92], [93] wurde festgestellt, dass an luftberührten, unbeschichteten Zementmörtel- und Betonkörperoberflächen Drücke eines relativ breit gefächerten Spektrums von  $-0,25$  bar bis  $+2,5$  bar entstehen, wenn an deren Unterseite Flüssigwasser ansteht. Hohe Drücke wurden nur beobachtet, wenn eine hohe Festigkeitsklasse des Betons vorlag und wenn die Probekörperhöhe kleiner als 100 mm war. Diese Ergebnisse korrelieren mit der Nichtanwendbarkeit der Theorie der Steighöhe von Wasser in kreisrunden Kapillaren und dem davon abgeleiteten Druck. Man postuliert daraus, dass Beschichtungen auf Basis von zweikomponentigen Epoxiden auf Bodenflächen, z. B. in Untergeschossen von Parkhäusern, zur Blasenbildung neigen, weil der gemessene Kapillardruck solche nach der Applikation und der Vernetzung erzwingt.

Der Zusammenhang zwischen Blasenbildung und Laborversuchen lässt zwar die Schlussfolgerung zu, dass ein solcher Mechanismus an Bodenflächen blasenverursachend sein kann. Gleichwohl stellt sich unmittelbar daran anschließend die Frage, wie es denn sein kann, dass sich an der Oberfläche von beschichteten Bodenplatten in Parkhäusern, wenn sie denn über verfügbarem Flüssigwasser angeordnet sind, solche Blasen entstehen können, obwohl gr-

ßere Bauteildicken vorliegen und geringere Betonfestigkeitsklassen gegeben sind, als dieses bei den herangezogenen Laborprobekörpern der Fall ist.

Die Übertragung auf vertikale Bauteilflächen – in Kapitel 3.6.5 sind von vielen verfügbaren Praxisbeispielen der letzten Jahrzehnte zwei genannt – scheint mit den beschriebenen Versuchen und Bewertungen nicht gegeben zu sein.

### 3.6.7 Beulenbildung aus mechanischer Einwirkung

In Kapitel 3.6.1 wurde bereits das Problem der Beulenbildung in Dachbeschichtungen angesprochen. Es tritt in gleicher Weise so auch in bituminösen Dachabdichtungsbahnen auf. Beulen sind auch in Dickschicht-Beschichtungen an Wänden von Kläranlagen [94] beschrieben worden. Analog wurden solche auch in PCC- / Polymerbeschichtungen an Stahlbetonwänden von Kläranlagen beobachtet. Allen diesen Fällen ist gemeinsam, dass ein geschwächter bzw. ein unzureichender Haftverbund zwischen den Schichtlagen und dem Untergrund gegeben war und dass betriebs- bzw. umgebungsbedingt ein Temperaturgefälle von der Oberfläche zum Substratbauteil entstanden ist. Stellvertretend soll der Mechanismus der Beulenbildung am Fallbeispiel einer Fußbodeninstandsetzung in einem Fertigungsbetrieb für elektronische Bauteile dargestellt und begründet werden.

#### Hergang und Bestandsaufnahme

Als Fußbodenkonstruktion liegt eine Stahlbetonplatte vor, die zu ca. 2/3 auf Erdreich liegt, und zu etwa 1/3 unterkellert ist. Bei der Erstellung des Bauwerks ist ein Zement-Verbundestrich eingebaut worden. Weil der Verbundestrich nach Jahren örtlich hohl lag und geschädigt war, hat der Hersteller der Werkstoffe zur Bodenbeschichtung dazu geraten, den gesamten Estrich auszubauen und durch einen neuen zu ersetzen. Der Auftraggeber konnte aus Zeit- und Kostengründen diesen Zusatzaufwand nicht akzeptieren.

Es ist dann der gesamte Boden im Kugelstrahlverfahren vorbereitet worden. Hohl liegende Estrichabschnitte wurden herausgestemmt. Die freiliegenden Beton-Teilflächen sind durch Handfräsen bearbeitet worden. Eine Vorbereitung im Sandstrahlverfahren war wegen der nebenan weiterlaufenden Produktion nicht möglich. Bild 109 zeigt den vorbereiteten Boden.

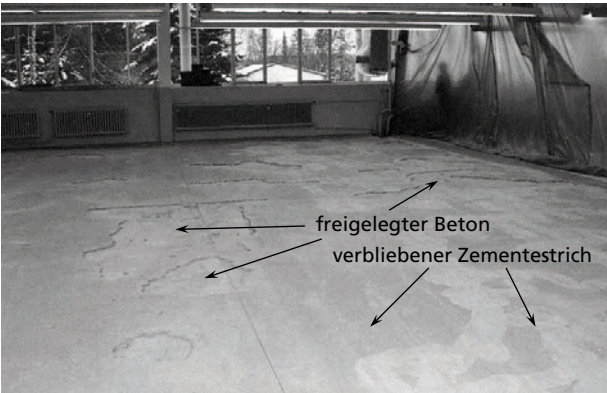
Die freiliegenden Betonflächen sind mit einer EP-Grundbeschichtung versehen worden. Frisch in frisch wurde ein EP-Estrich, bestehend aus 1 MT EP-Flüssigharz zu 10 MT Quarzsand 10 bis 40 mm dick, eingebaut. Der EP-Estrich ist einem Zementestrich vorgezogen worden, um eine schnelle Überarbeitung zu gewährleisten. Der gesamte Boden ist mit einem Beschichtungs-

aufbau, bestehend aus ECC, EP-Grundbeschichtung und EP-Deckbeschichtung, versehen worden.

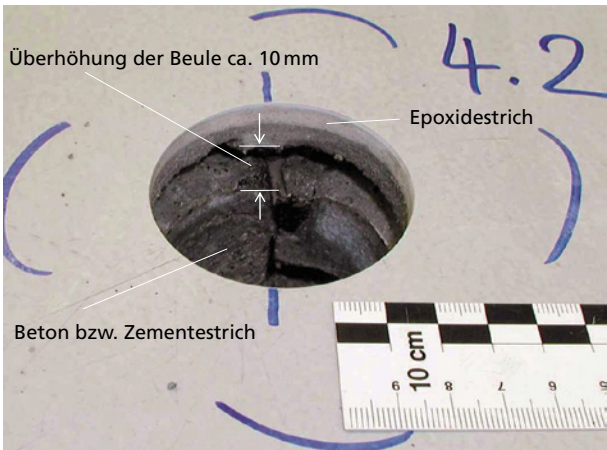
Innerhalb eines Jahres sind vermehrt Hohllagen mit Beulenbildung festgestellt worden. Deren Durchmesser schwankte zwischen 10 cm und 1 m. Mittels Betonbohrkrone sind einige Bodenbereiche angebohrt worden. Bild 110 zeigt das Bohrloch im Bereich einer Beule.

Bild 111 zeigt den Aufbau eines entnommenen Bohrkerns an einer beulfreien Stelle, an der Beton, Zementestrich und Beschichtung einen innigen Verbund aufweisen. Bild 112 zeigt einen zweiteiligen Bohrkern, der aus einer Beule herausgebohrt worden ist. Auffallend ist die ebenförmige Trennfläche zwischen Beton und EP-Estrich.

Bild 113 zeigt die Rückseite des Betonkernoberteils gemäß Bild 112.

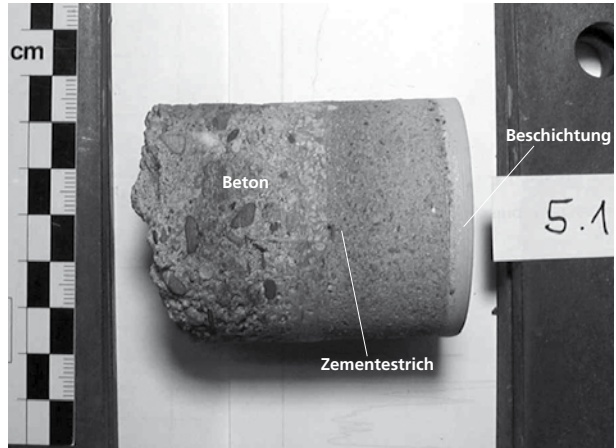


**Bild 109** ■ Teilansicht des Fußbodens nach Ausstemmen schadhaften Estrichs und nach der Vorbereitung

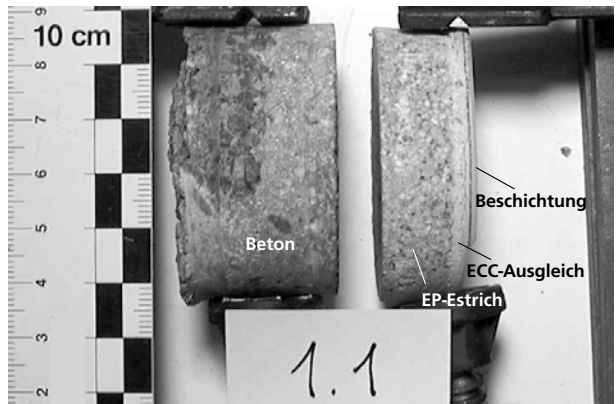


**Bild 110** ■ Bohrlochaufbau im Bereich einer Beule

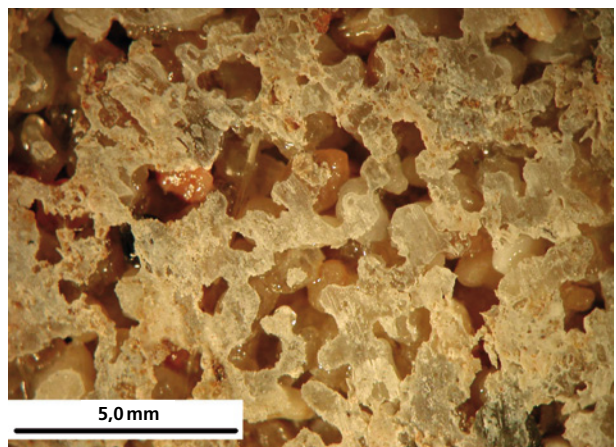
**Bild 111** ■ Bohrkern mit innigem Verbund der Einzelschichten



**Bild 112** ■ Bohrkern aus Beule mit Adhäsionsbruch zwischen Beton und EP-Estrich



**Bild 113** ■ Stereomikroskopische Aufnahme der Rückseite des Beulenoberteils (EP-Estrich)





## Beulmechanismus

Der Verbundestrich wurde durch Kugelstrahlen vorbereitet. Dieses Verfahren konnte in den Estrichausbrüchen auf dem dort freiliegenden Beton nicht angewendet werden. Stattdessen wurde dort ›mechanisch‹ gereinigt.

In die Ausbrüche wurde EP-Estrich eingebaut. Die gesamte Bodenfläche ist mit mehreren Einzellagen polymergebundener Beschichtungen versehen worden. Der Jahreszeit entsprechend erfolgte die Ausführung bei Raumtemperaturen  $< 15^{\circ}\text{C}$ .

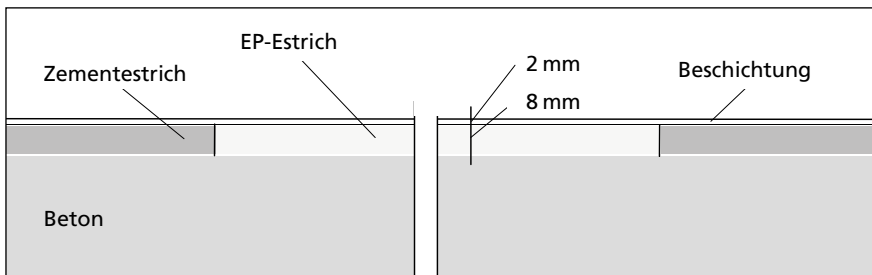
Aufgrund dieser Faktenlage lässt sich das Beulen wie folgt rekonstruieren:

Bild 114 zeigt modellhaft den Bodenaufbau an einer Stelle, an welcher der herausgetrennte Zementestrich durch den EP-Estrich ersetzt worden ist. Zusammen mit der Beschichtung sei diese organisch gebundene Schicht 10 mm dick. Der Abschnitt des EP-Estrichs ist vertikal angeschnitten, um zu zeigen, dass die Länge zwischen den verbleibenden Enden des Zementestrichs variabel ist. Die Dicke der Betonplatte ist nicht maßstäblich.

Auf Erdreich ist die Temperatur an der Unterseite der Stahlbetonbodenplatte langfristig relativ konstant. Gegenüber der angenommenen Einbautemperatur von  $\leq 15^{\circ}\text{C}$  hat sich die Temperatur der oben angrenzenden Luft danach nur noch erhöht; mit Spitzenwerten im Sommerhalbjahr. Der EP-Estrich, der sich zwischen den beiden Enden der verbliebenen Zementestrichschichten befindet, will sich wegen seines höheren thermischen Längenänderungskoeffizienten  $\alpha$  ausdehnen. Durch die beidseitige Einspannung wird er jedoch daran gehindert. Die dabei entstehenden Druckspannungen parallel zur Betonplatte können mit folgender Formel abgeschätzt werden:

$$\beta_D = E \cdot \varepsilon = E \cdot \alpha \cdot \Delta\vartheta \quad [\text{N/mm}^2] \quad (2)$$

Für den Elastizitätsmodul  $E$  kann ein Wert von  $20.000 \text{ N/mm}^2$  angenommen werden. Der thermische Längenänderungskoeffizient  $\alpha$  beträgt effektiv ca.



**Bild 114** ■ Bodenaufbau im Bereich einer EP-Estrich-Egalisierung

$25 \times 10^{-6} \times K^{-1}$ . Für drei mögliche Temperaturintervalle resultieren folgende Druckspannungen:

für  $\Delta\vartheta = 5\text{ K} \rightarrow 2,5\text{ N/mm}^2$ ,

für  $\Delta\vartheta = 10\text{ K} \rightarrow 5,0\text{ N/mm}^2$ ,

für  $\Delta\vartheta = 15\text{ K} \rightarrow 7,5\text{ N/mm}^2$ .

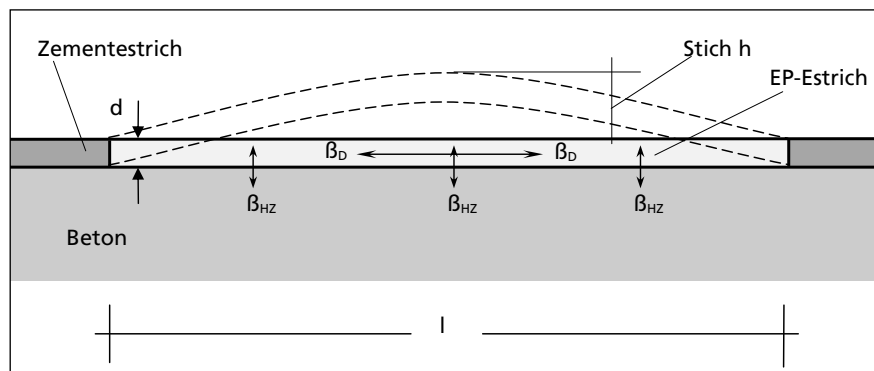
Dabei wird vereinfachend angenommen, dass sich die Bodenplatte mit Verbundestrich ›neutral‹ verhält.

Wenn sich wegen der behinderten Ausdehnung parallel zur Betonbodenplatte Druckspannungen aufbauen, ist die Schicht bestrebt, senkrecht dazu auszuweichen. Nach unten ist das nicht möglich, jedoch nach oben. Bild 115 veranschaulicht anhand des Vertikalschnitts was dann passiert. Zunächst entstehen in der Grenzfläche zur Stahlbetonbodenplatte senkrecht gerichtete Haftzugspannungen  $\beta_{HZ}$ . Wenn der Haftverbund überwunden ist, kommt es zu einer Aufwölbung der am Ausdehnen behinderten Schicht.

In Kenntnis der Weglänge  $l$  und der Dicke  $d$  des EP-Estrichs lässt sich abschätzen, wie hoch die kritische Wölbspannung  $\beta_K$  sein muss, um eine Beule zu erzwingen [95].

$$\beta_K = \frac{\pi^2}{6} \cdot E \cdot \left(\frac{d}{l}\right)^2 \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3)$$

Setzt man den E-Modul  $20.000\text{ N/mm}^2$  sowie eine Dicke von  $10\text{ mm}$  und eine Weglänge von  $1\text{ m}$  ein, beträgt die zum Aufwölben notwendige Spannung  $3,3\text{ N/mm}^2$ .



**Bild 115** ■ Temperaturgenerierte Aufwölbung der EP-Estrich-Egalisierung

Weiterhin lässt sich rechnerisch abschätzen, bei welchem kritischen Temperaturintervall  $\Delta\vartheta_K$  eine Aufwölbung eintreten wird, immer vorausgesetzt, der Haftverbund zum Unterbau ist überwunden.

$$\Delta\vartheta_K = \frac{\pi^2}{6} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{d}{l}\right)^2 \quad [\text{K}] \quad (4)$$

$$= 6,6 \text{ K}$$

Schließlich lässt sich auch noch rechnerisch abschätzen, welches Stichmaß  $h$  die Beule mittig erreicht, wenn der EP-Estrich den drei genannten Temperaturintervallen ausgesetzt wird:

$$h = 0,61 \cdot l \cdot \sqrt{\alpha \cdot \Delta\vartheta} \quad [\text{mm}] \quad (5)$$

für  $\Delta\vartheta = 5 \text{ K} \rightarrow 6,8 \text{ mm}$

für  $\Delta\vartheta = 10 \text{ K} \rightarrow 9,6 \text{ mm}$

für  $\Delta\vartheta = 15 \text{ K} \rightarrow 11,8 \text{ mm}$

Diese modellhafte Darstellung zeigt, dass durch Temperaturerhöhung eine Aufwölbung realistisch ist. Die errechneten Stichhöhen liegen in der Größenordnung der beobachteten. Die temperaturbedingt aufgetretenen Druckspannungen sind oberhalb der kritischen Wölbspannung.

Die Aufwölbung setzt allerdings voraus, dass der Verbund des EP-Estrichs zum Beton geschwächt ist. Aufgrund der Informationen zum Instandsetzungsablauf und zu den Untersuchungen an den Bohrkernen war dies tatsächlich auch der Fall: Einerseits erzielt man mit einem EP-Estrich – auch unter Verwendung einer EP-Haftbrücke – mit Beton keinen optimalen Haftverbund, wenn der Beton nur durch Schaben, Abkehren, Handfräsen o.Ä. bearbeitet wird, anstelle durch Druckluftstrahlen mit festem Strahlmittel oder durch Schleuderradstrahlen. Andererseits veranschaulichen die relativ glatten Trennflächen zwischen Beton und EP-Estrich, dass eine Schwächung des Haftverbunds vorgelegen haben muss. In Bild 113 erkennt man eine effektive Haftfläche von ca. 50 % der maximal möglichen, hervorgerufen durch das kavernöse Gefüge des EP-Estrichs. Hier wäre durch eine abgestufte Sieblinie des Quarzzuschlags bzw. durch mechanische Verdichtung eine Verbesserung möglich gewesen. Ob diese Maßnahmen ausgereicht hätten, bleibt angesichts der praktizierten unzureichenden Untergrundvorbereitung fraglich.

Aus Gleichung (3) erkennt man, dass die Dicke  $d$  und die Weglänge  $l$  der organisch gebundenen Schichten umgekehrt proportional im Quadrat in das Ergebnis eingehen. Somit erklärt sich auch die in Kapitel 3.6.1 geäußerte Beobachtung, dass Beulen in der Regel größere Durchmesser haben als Blasen.

Sie entstehen umso leichter, je größer bei verharrender Dicke der Schicht die Weglänge des Verbundverlustes zum Untergrund ist.

## 3.7 Verbundversagen (V)

### 3.7.1 Erscheinungsformen

Nach ihrer äußeren Erscheinung lassen sich verschiedene Arten des Verbundversagens unterscheiden:

- Für das sogenannte **Abschuppen** (engl. flaking) ist das Abfallen relativ kleiner Flächenstücke, maximal etwa 5 mm Durchmesser, kennzeichnend.
- Vom **Abblättern** (engl. scaling) spricht man, wenn sich blättrige, größere Flächenteile als beim Abschuppen ablösen. Dem Abschuppen und Abblättern geht immer ein Rissigwerden meist relativ spröder Beschichtungen voraus. Danach folgt häufig ein von den Rissen ausgehendes **Aufschüsseln** von Teilflächen, wie dies in Bild 116 gezeigt ist, weil die Verkrümmungsbestrebungen der Teilflächen den Haftverbund am Untergrund überwinden können [96]. Meist sind die durch Abschuppen oder Abblättern freigelegten Einzelflächen umso größer, je dicker die Beschichtung ist.
- Ein **Abschälen** (engl. peeling) liegt dann vor, wenn sich eine relativ weiche und daher biegsame Beschichtung in zusammenhängenden Stücken vom Untergrund abziehen lässt oder sich aus eigenem Antrieb abschält. Die flexible Beschichtung hat eine gute Kohäsion, jedoch ist der Haftverbund meist nicht sehr hoch. Bildet sich Letzterer nicht optimal aus, weil ein nicht tragfähiger Untergrund vorliegt (Kapitel 2.5) oder eine weitere Schwächung des Haftverbunds eintritt, z.B. durch Quellvorgänge, wird der Abschäleffekt begünstigt.
- Die **Unterwanderung** setzt eine Verletzung der Beschichtung, z. B. durch einen Riss, eine Fehlstelle oder eine mechanische Beschädigung, voraus. Von den so geschaffenen Rändern kann das Unterwandern der Beschichtung seinen Ausgang nehmen.

So haben die Erscheinungen Abblättern und Abschuppen ihre Bezeichnung von der gedrungenen Form und Größe der freigesetzten Flächenteile, das Abschälen von der Biegsamkeit des schlecht haftenden Beschichtungsteils. Beim Unterwandern ist der Mechanismus, der zum Verbundverlust führt, namensgebend. Längs eines Risses führt das Unterwandern zu einem streifenförmigen Abheben. Beim Abschuppen oder Abblättern verursacht das Unterwandern eine stetige Vergrößerung der Fehlstelle durch Hinzufügen von Einzelfehlstellen. Hauptbeteiligt bei der Unterwanderung ist Wasser, welches Quellvorgänge bewirkt, Korrosion auslöst, Salze aus dem Untergrund löst,



**Bild 116** ■ Die Beschichtung einer Schornsteinmündung ist als Folge der chemischen Belastung und der damit verbundenen Versprödung gerissen, aufgeschlüsselt und zum Teil abgeblättert.

die unter der Beschichtung kristallisieren, u. a. m. Allesamt Vorgänge, die zur Schwächung oder zum Verlust des Haftverbunds zwischen Beschichtung und Untergrund führen.

- Beim Betasten oder Bestreichen einer Beschichtungs Oberfläche mit einem Werkzeug (**Hammer-Tast-Methode**) äußern sich **enthaftete Bereiche** einer Beschichtung durch ein typisches Rascheln. Bei harten Beschichtungen lassen sie sich darüber hinaus auch durch Abklopfen (**Hammer-Klopf-Methode**) am Hohlklang erkennen. Bei unpigmentierten Beschichtungen sind hohl liegende Teilflächen auch optisch erkennbar. Der nicht mehr benetzte Untergrund hat dann oft ein blässeres Aussehen als die im Haftverbund befindliche Beschichtung. Während das Abschuppen, Abblättern, Abschälen und Unterwandern vorhergehende Rissbildungen oder eine andersgeartete künstliche Verletzung voraussetzt, liegen Hohllagen vor allem

dann vor, wenn zwar ein Verbundverlust gegeben ist, die Beschichtung insgesamt aber noch weitgehend intakt ist.

Wichtige Kriterien zur Ursachenfindung eines Verbundversagens sind die Beschaffenheit, speziell die Feinstruktur der Trennflächen, sowie der Ort der Bruchebene im Beschichtungsaufbau.

Aus der **Lage der Trennfläche** im Beschichtungssystem erkennt man, welche Schicht bzw. welche Grenzfläche die schwache Stelle ist. Bei nicht genügend tragfähigem Untergrund erfolgt der Bruch in dessen Randzone. Nicht selten beobachtet man dieses Versagensmerkmal auf wenig festen Untergründen wie Gipsputzen, Fassadenputzen, verwittertem Beton und auf Sandsteinflächen. Im Regelfall liegt eine nicht genügende Untergrundvorbereitung (siehe Kapitel 2.5) als Ursache des Verbundversagens vor. Liegt aufgrund einer Unverträglichkeit zwischen zwei Schichten systemimmanent ein schlechter Verbund vor, oder führen Wasser, Lösemittel oder ähnliche Medien zu einer quellungsbedingten Verbundschwäche, wird sich die Beschichtung meist ohne Rückstände vom Untergrund lösen. Bei den sogenannten Mischbrüchen liegt eine Kombination von Flächenbereichen vor, welche einerseits durch Ablösen in der Grenzfläche (**Adhäsionsbruch**) und andererseits durch Bruch innerhalb einer Schicht (**Kohäsionsbruch**) gekennzeichnet sind. Bei einer mechanisch und durch Wassereinwirkung beanspruchten Beschichtung kann zunächst infolge Quellung eine örtliche Verbundschwäche in der Haftfläche zum Untergrund auftreten. Sind die dermaßen zustande gekommenen Flächenbereiche mit geschwächtem Verbund genügend groß, so kann eine nachfolgende mechanische Beanspruchung der Beschichtung zu deren völligem Ablösen führen.

### 3.7.2 Ursachen eines schlechten Haftverbunds

Zur Erzielung eines dauerhaften Haftverbunds zwischen Untergrund und Beschichtung sind zwei wesentliche Voraussetzungen notwendig:

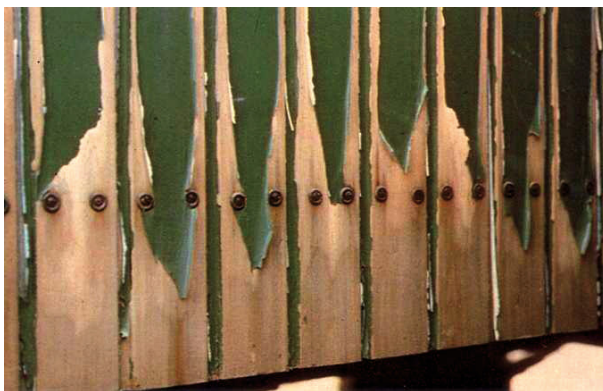
Zum einen muss eine Affinität zwischen den beiden Stoffsystemen gegeben sein, sodass sich intermolekulare Kraftschlüsse einstellen können. Phobien zwischen Beschichtung und den infrage kommenden metallischen, mineralischen oder organischen Untergründen sind kontraproduktiv. Diesbezüglich sind die materialtechnischen Kenntnisse und die Erfahrung aus Experimenten des Werkstoffformulierers gefragt. Zur optimalen Stoffformulierung gehört auch, dass der flüssige Beschichtungsstoff rheologisch so eingestellt ist, dass er den Untergrund ausreichend lang und vollständig benetzen kann, ehe seine planmäßige Verfestigung zur Beschichtung einsetzt.



Zum anderen ist es im Regelfall haftverbundfördernd, wenn der Untergrund nicht planeben glatt, sondern feinrau ist. Dadurch wird die Haftverbundfläche gegenüber dem glatten Untergrund vergrößert. Außerdem hat der optimal benetzende und kriechfähig eingestellte Beschichtungsstoff dann auch noch die Möglichkeit, sich im Untergrund zu verkrallen.

Grundsätzlich muss der Stoffhersteller bei der Formulierung eines Beschichtungsstoffs bereits mögliche Wechselwirkungen zwischen Beschichtung und dem zu beschichtenden Baustoff berücksichtigen. So können z. B. fettsäurehaltige (pflanzliche) Bindemittel oder deren Abkömmlinge auf Stahl und Holz meist ohne Probleme eingesetzt werden. Wegen der Gefahr der Verseifung (siehe auch Kapitel 3.8.2) können sie dagegen auf zementgebundenen Baustoffen in der Regel nicht angewandt werden. Trotzdem kommt es auch bei Einhaltung solcher Grundregeln immer wieder zum Verbundversagen.

Untergründe können zur Zeit des Beschichtens so feucht sein, dass der für eine Haftung notwendige innige Kontakt zwischen der Beschichtung und dem Untergrund wegen der Anwesenheit des Wassers nicht zustande kommt. Auch andere Kontaminationen, wie z. B. Staub etc., können eine Behinderung sein. Da gelten im Allgemeinen die Regeln der Platzwechseltheorie, wonach die Benetzung eines Substrats nicht erfolgen kann, solange an der Oberfläche oder in Poren behindernde Ablagerungen vorliegen. Porige und vor allem kapillar leitfähige Untergründe können auch erst nach dem Beschichten feucht werden, z. B. im Wege einer rückwärtigen Durchfeuchtung nicht allseitig beschichteter Bauteile oder durch eine Wassergehaltsumlagerung im Untergrund nach dem Beschichten. Wenn die Beschichtung für Wasser quellbar ist, kann es dadurch zur Schwächung des Haftverbunds kommen. Bild 117 zeigt dies anhand einer unvollständigen Beschichtung auf Holz. Auch kommt es vor, dass – bei einem Bauteil im Freien – als Folge der Frosteinwirkung auf das



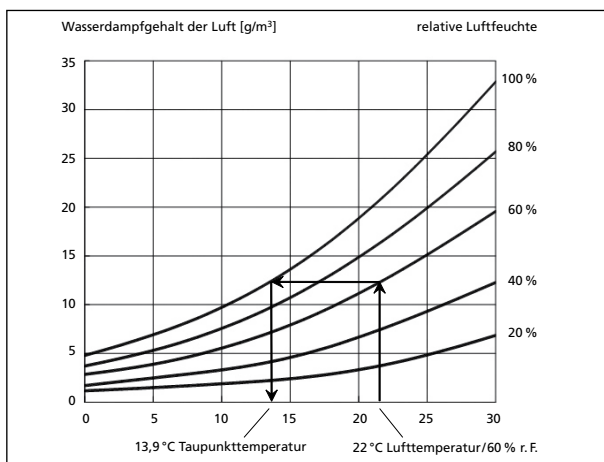
**Bild 117** ■ Abblätternde Beschichtung als Folge des an der ungeschützten Unterkante eingedrungenen und die Beschichtung rückwärtig durchfeuchtenden Wassers

an der Rückseite sich angereicherte Flüssigwasser eine Verbundschwächung auftritt.

Auch nicht porige Untergründe, wie z. B. Metalle, können an der zu beschichtenden Oberfläche feucht sein. Je höher die relative Luftfeuchte der Umgebung, desto dicker ist der submikroskopische Wasserfilm, der an einer hydrophilen Oberfläche adsorptiv gebunden wird. Ein solcher Wasserfilm ist im Allgemeinen nicht schädlich, solange die relative Luftfeuchte deutlich unterhalb 100 % liegt. Ist die Temperatur der umgebenden Luft deutlich höher als die des zu beschichtenden Untergrunds (was sich im Freien sehr schnell einstellen kann), kann es auch bei relativen Feuchten in der Luft von weniger als 100 % zur Kondensation von Wasserdampf aus der Luft auf dem Untergrund kommen. Diese für die Haftung einer aufzubringenden Beschichtung bedenkliche Situation muss durch Kontrolle der sogenannten **Taupunkttemperatur** vermieden werden.

Der Zusammenhang zwischen dem absoluten Wasserdampfgehalt der Luft und der damit korrespondierenden relativen Luftfeuchte als Funktion der Temperatur ist in Bild 118 dargestellt. Ob auf einer zu beschichtenden Fläche Wasserdampfkondensation auftritt, wird anhand dieser Grafik dadurch bestimmt, dass auf der Abszisse die Lufttemperatur markiert (22 °C) wird und dieser Punkt nach oben verlängert wird, bis die Kurve die gegebene relative Luftfeuchte (60 %) kreuzt. Von dort wird eine Parallele zur Temperaturachse bis zur Kurve gezogen, welche die relative Luftfeuchte von 100 % darstellt und es wird das Lot auf die Abszisse gefällt. Dort befindet sich die sogenannte Taupunkttemperatur, bei welcher Wasserdampf der betrachteten Luft auf einer Bauteiloberfläche mit dieser Temperatur kondensieren würde. Diese Beschreibung physikalischer Vorgänge und deren Kenntnis fördert das

**Bild 118** ■ Wassergehalt der Luft in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte und der Temperatur; Zusammenhang mit der Taupunkttemperatur



Verständnis bauklimatischer Gegebenheiten bei der Beschichtungsanwendung. Die Bestimmung der Taupunkttemperatur der Luft bzw. eines an sie angrenzenden Bauteils lässt sich auch mithilfe von mikroprozessorgesteuerten Geräten sehr schnell und genau durchführen.

Bild 119 zeigt die Stahlbeton-Kegelschale eines Trinkwasserturms mit zwei Kammern. Die äußere Kammer ist gefüllt, die innere Kammer ist leer. Auf der Außenseite der Kegelschale hat sich auf der Leeseite (Windstille) ein Wasserfilm gebildet, weil die Taupunkttemperatur auf der Betonoberfläche unterschritten worden ist. Die betaute Fläche zeichnet sich im rechten Bildbereich etwas dunkler ab. Demgegenüber ist es auf der gegenüberliegenden Luvseite der Kegelschale unter gleichen klimatischen Bedingungen nicht zur Betauung gekommen, weil der anströmende Wind den Feuchteübergangswiderstand beeinflusst und dabei das Abtrocknungsverhalten begünstigt hat [97]. Die im Zuge der Instandsetzung geplanten Beschichtungsarbeiten müssen bei solchen Klimaphasen unterbrochen werden, da sonst mit gravierenden Verbundstörungen gerechnet werden muss.

Auch durch andere Substanzen kann die Haftung einer Beschichtung auf einem Untergrund entweder von Anfang an oder nachträglich verhindert, geschwächt oder geschädigt werden. Haftungsschädlich sind u. a. Rückstände von Entschalungshilfsmitteln in der Oberflächenzone von Beton, eine geringe Festigkeit infolge einer gestörten Hydratation der Betonrandzone, belassene Rostpartikel auf Stahlflächen, labile Zinkcarbonatschichten auf Zink- oder verzinkten Bauteilen, Staub, Schmutz, Fette und viele andere lose Festteilchen bzw. festigkeitslose Substanzen.



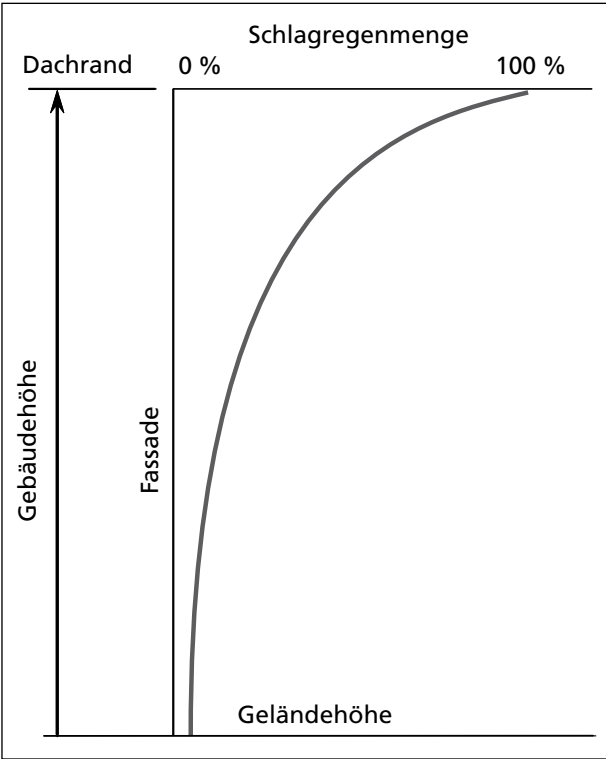
**Bild 119** ■ Tauwasserbildung (dunkle Teilfläche der Kegelschale, rechts) an einem Trinkwasserbehälter während der Instandsetzungs- und Beschichtungsarbeiten

An kathodischen Bezirken können sich bei korrodierendem Eisen bzw. Stahl mit eingedrungenem Wasser Basen bilden, die verseifbare Beschichtungsbestandteile zerstören und damit den Verbund mindern bzw. aufheben.

Schließlich ist auch auf die Möglichkeit des Filtrier- bzw. **Chromatografieeffektes** eines saugenden Untergrunds auf eine Beschichtung hinzuweisen: Durch Kapillarkräfte wird das Bindemittel der Beschichtung in den porösen Untergrund abgesaugt, während die Pigmente und Füllstoffe in die Untergrundporen nicht eindringen können und sich daher an der Oberfläche des Untergrunds anreichern. Polymerbindemittel, insbesondere chemisch vernetzende, können im Flüssigzustand partiell separiert werden, sodass ein unterschiedliches Eindringen verschieden großer Moleküle und damit eine gestörte Härtung eintritt. So kann eine sehr hoch gefüllte Beschichtung bzw. ein Bindemittel mit unvollständiger chemischer Verfestigung auf dem Untergrund zurückbleiben, im Gefolge derer alterungsbedingte oder temperaturbedingte Eigenspannungen der Deckschichten gegen eine äußere Belastung mechanisch nicht mehr ausreichend widerstandsfähig sind und zum Ablösen der Deckschichten führen.

Eine der häufigsten Ursachen für das Verbundversagen einer Beschichtung ist die nicht sorgfältig ausgeführte Vorbereitung des Untergrunds. Maßnahmen dazu sind in Kapitel 2.5 ausführlich beschrieben. Eigentlich ist es selbstverständlich, dass ein zu beschichtender Untergrund von Staub, Wasser und anderen haftungsmindernden Verschmutzungen befreit werden muss. Die Erfahrung zeigt, dass die Notwendigkeit dazu oft unterschätzt wird. Auch herrscht gelegentlich die fatale Meinung vor, man könne einen nicht optimal tragfähigen Untergrund durch »staubbindende« bzw. »verfestigende« Grundierungen verbessern. Der verantwortungsvolle Ausführer von Beschichtungsmaßnahmen nimmt von solchen Überlegungen grundsätzlich Abstand.

In diesem Zusammenhang muss auch darauf hingewiesen werden, dass insbesondere Sichtbeton- und Putzflächen an Fassaden sowohl fertigungsbedingt als auch expositionsbedingt örtlich unterschiedliche Beschaffenheiten aufweisen können, die bereits der Planer berücksichtigen und auf die sich der Anwender von Beschichtungen bei der Vorbereitung durch Intensivierung einstellen muss. Bild 120 zeigt die Schlagregenbeanspruchung im Profil als Funktion der Höhe eines in freier Südwestlage befindlichen Gebäudes. Durch die Zunahme der Regenbeaufschlagung, und gestützt durch die meist intensivere Sonneneinstrahlung in den größeren Höhen von Fassaden, tritt sowohl bei beschichteten als auch bei unbeschichteten Flächen zu größeren Gebäudehöhen hin eine stärkere Verwitterung auf. Bild 121 zeigt eine beschichtete Putzfassade aus südwestlicher Richtung. Bis in eine mittlere Gebäudehöhe waren keine Schäden aufgetreten, zunehmend ab da jedoch bis zum Dach-



**Bild 120** ■ Schlagregenprofil an der Südwestfassade eines freistehenden Gebäudes

rand des ca. 30 m hohen Gebäudes. Dem kann prinzipiell dadurch begegnet werden, dass in stärker exponierter Lage eine höhere Güteklasse des Verputzes und der Fassadenbeschichtung zur Anwendung gelangt.

Markant ist auch der Fall, der in Bild 122 im Detail gezeigt ist: Mineralisch gebundene Fassadenplatten waren werksmäßig mit einer Silikatfarbe entsprechend [5] versehen worden. Jahre später wurde die Fassade mit einer Acrylatbeschichtung ertüchtigt. An der Südwestfassade des ca. 20 m hohen Gebäudes traten einige Zeit später Abblätterungen der Acrylatbeschichtung auf, die auch hier von der halben Gebäudehöhe nach oben zunehmend ausgeprägt waren. Zum Schaden war es deshalb gekommen, weil der Ausführungsunternehmer seine Vorbereitungsmaßnahmen nach dem Zustand der mit der Silikatfarbe versehenen Fassadenplatten in Geländehöhe ausgerichtet hat. Dabei blieb unberücksichtigt, dass in den oberen Höhen mehrende und kroidende Oberflächen der dort wesentlich stärker verwitterten Silikatfarbe vorlagen. Entsprechend dem Verwitterungszustand hätte mit zunehmender Gebäudehöhe eine zu intensivierende Untergrundvorbereitung durchgeführt werden müssen.

**Bild 121** ■ Verputzte und beschichtete Fassade; witterungsbedingte Abplatzungen mit zunehmender Gebäudehöhe



**Bild 122** ■ Acrylfassadenbeschichtung auf kreidendem Untergrund, Abblättern und Gitterschnittkennwert zeigen schlechten Haftverbund an





Eine dauerhafte Verbindung zwischen einem Beschichtungssystem und seinem Untergrund ist eine unbedingt notwendige Voraussetzung für die Aufrechterhaltung der dem Beschichtungssystem zugedachten Wirkung. Nach dem heutigen Wissensstand ist weitgehend geklärt, welche Baustoffe in welcher Situation mit welchen Vorbereitungsverfahren dies leisten können.

In diesem Sinne müssen problematische Untergründe, für die eine Beschichtung nicht in Erwägung gezogen werden sollte, weil z. B. die Untergrundvorbereitung unwirtschaftlich wäre oder weil aus grundsätzlichen Erwägungen kein akzeptabler Verbund zu erwarten ist, vom sachkundigen Planer bereits im Vorfeld einer Beschichtungsanwendung erkannt werden. Gegebenenfalls sind besondere materialtechnische Untersuchungen zu berücksichtigen, insbesondere wenn es um die Ertüchtigung noch haftender Beschichtungen geht.

## 3.8 Zersetzungserscheinungen (Z)

### 3.8.1 Übermäßige Erweichung oder Versprödung

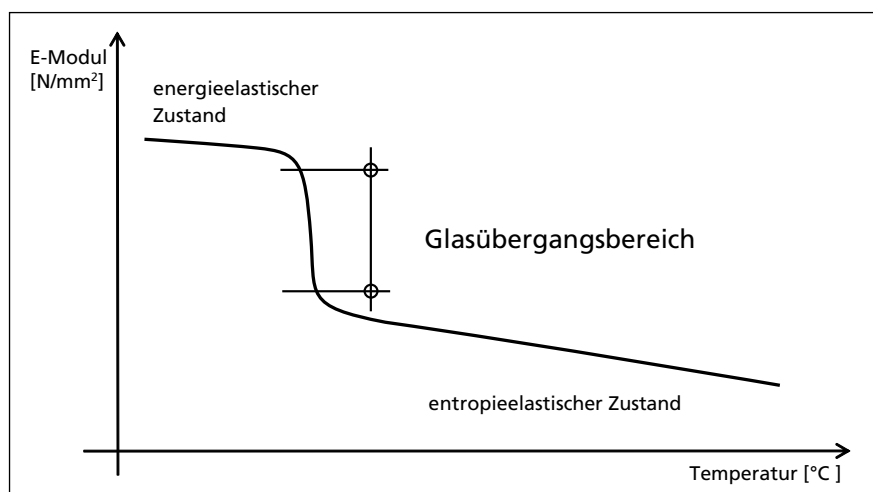
Unter **Quellung** versteht man das meist reversible ›Aufblähen‹ eines polymeren Molekülverbandes durch Flüssigkeiten mit entsprechend chemisch-physikalischer Affinität zum quellenden Polymer. Ein Auflösen des Molekülverbandes ist damit nicht verbunden.

Die schädliche Auswirkung einer Quellung besteht hauptsächlich in dem damit verbundenen Nachlassen des Haftverbunds und in einer erhöhten mechanischen Empfindlichkeit der Beschichtung. Infolge Quellung kann die Beschichtung vom Untergrund abgetrennt werden, gefolgt von einer Falten- oder Blasenbildung (siehe Erscheinung K in Bild 80 sowie Bild 86), weil die Fläche der Beschichtung vergrößert wird. Dadurch werden eine erhöhte Verletzlichkeit und ein vorzeitiger Verschleiß etc. herbeigeführt. Grundsätzlich muss deshalb bereits bei der Formulierung des Beschichtungsstoffs die Frage der Beständigkeit gegen Agenzien aus der Betriebsbeanspruchung berücksichtigt werden, um eine unzulässige Quellung zu vermeiden, auch wenn diese lediglich eine reversible physikalische Erscheinung darstellt. Die praktische Anwendung von Beschichtungen im Kontakt mit quellbaren Substanzen hat gezeigt, dass Elastomere eine höhere Quellung (etwa 5 %) ertragen können als Duromere (etwa 1 %), bevor nennenswerte Schäden zu erwarten sind. Fachumgangssprachlich spricht man vom **Hochziehen** der Beschichtung, wenn Beschichtungsstoffe mit stark wirkenden Lösemitteln auf vorhandene, rein physikalisch getrocknete Beschichtungen mit relativ leicht quellbarem Bindemittel aufgebracht werden, und diese sich mit entsprechender Faltenbildung abheben.

Das **Verspröden** ist oftmals eine Folge der Alterung bzw. des nachfolgenden Zersetzens des Polymerbindemittels. Es tritt dabei praktisch das Gegenteil des Erweichens in Form eines Quellungsvorganges ein. Die alterungsbedingte Verhärtung einer Beschichtung wird meist auch von einer Volumenverkleinerung mit dabei entstehenden Eigenspannungen begleitet. Definitionsgemäß spricht man vom Rückgang der Dehnbarkeit. Die im Zuge einer Versprödung auftretenden Eigenspannungen führen bei gleichzeitig abfallendem Kohäsionsvermögen zur Schrumpf- oder Schwindrissbildung etc. (siehe dazu auch Bild 60). Mehrere Ursachen können zu einem Verspröden führen:

- Einerseits sind Alterungsvorgänge, wie sie in Kapitel 2.8 behandelt wurden, in der Regel mit einem Verspröden und Versteifen der Beschichtung verbunden.
- Andererseits versteifen sich Polymere zum Teil reversibel bei tiefer Temperatur, weil die Molekülkettensegmente infolge Wärmeentzug quasi einfrieren (Rückgang der Brown'schen Molekularbewegung). Bei mechanischer Belastung neigen sie dann leichter zum Brechen.

Anschaulich dargestellt werden kann dieses Verhalten anhand der Abhängigkeit des E-Moduls von der Temperatur im Zusammenhang mit dem Glasübergangsbereich [70] wie es in Bild 123 gezeigt ist. Mit fallender Temperatur findet plötzlich ein rascher Übergang des zunächst entropieelastischen Zustands (flexibel) in den energieelastischen Zustand (steif) statt. Man nutzt diesen Effekt auch zur Entfernung von Polymerbeschichtungen auf Beton aus [98].



**Bild 123** ■ Typischer Verlauf des E-Moduls eines Epoxidharzes als Funktion der Temperatur; sprunghafte Eigenschaftsänderung im sogenannten Glasübergangsbereich

Polymerbeschichtungen können andererseits aber auch nach rascher Erwärmung [99] so stark erweicht werden, dass sie leicht abtragbar sind. Eine länger anhaltende oder immer wiederkehrende Erwärmung kann schließlich auch zur Versprödung führen, wenn dadurch weichmachende Bindemittelbestandteile aus dem Molekülverband ausgetrieben werden. In analoger Weise kann auch eine Extraktion weichmachender Bindemittelanteile durch Flüssigkeitsbeanspruchung zu einer Versprödung führen, mit den damit verbundenen Nachteilen bezüglich der Funktion und der Nutzbarkeit der Beschichtung.

### 3.8.2 Chemische Zersetzung

Im Bauwesen kommt es dann am ehesten zu chemisch verursachten Zersetzungserscheinungen von Beschichtungen, wenn ein Einwirken von Basen (in Wasser dissoziierte Hydroxide vom Typ  $\text{Me}^+\text{OH}^-$ ) erfolgt. Man bezeichnet den Vorgang als Verseifung (basische Hydrolyse, [47]), weil das Endprodukt schmierigen Charakter hat, analog zur klassischen Schmierseife. Basen, die als schädigende Kontaktmedien für Beschichtungen wirken, stammen vor allem aus kalk- und zementhaltigen Baustoffen, d. h. aus Beton, Putz und Estrich. Es bedarf dazu immer des Wassers, welches die in den Baustoffen vorliegenden Calcium-, Natrium-, Kaliumhydroxide etc. in Lösung bringen muss. Deshalb treten entsprechende Versagenserscheinungen auch am ehesten im Unterwasserbereich oder bei durchfeuchteten Baustoffen im Tiefbau oder an Bauteilen in der Freibewitterung auf. Eine temporäre Verseifungsgefahr liegt bei zementgebundenen Baustoffen in der Anfangsphase vor, wenn die Carbonatisierung [100] zumindest in Randnähe des zu beschichtenden Bauteils eine Absenkung des pH-Wertes noch nicht bewirkt hat und andererseits basisch hydrolysierbare Bindemittel angewendet worden sind.

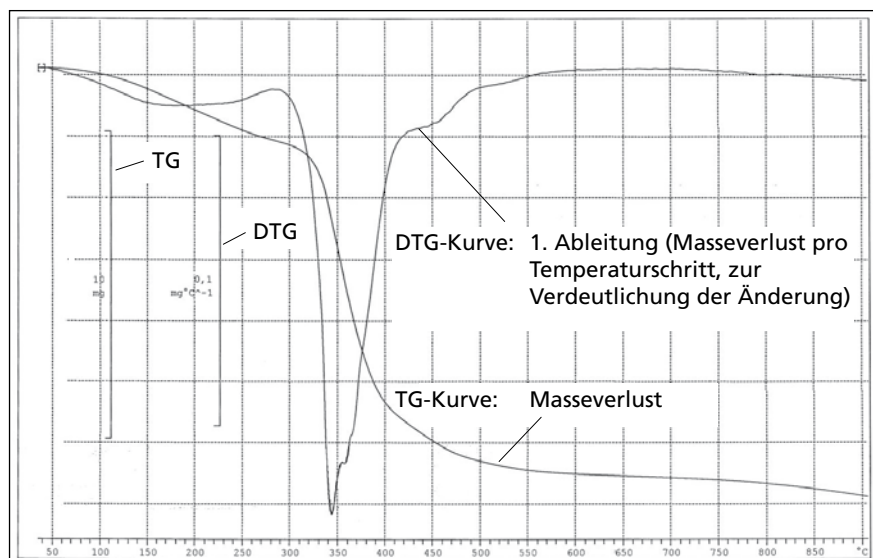
Eine Zersetzung verläuft rasch, wenn die angreifende Base in die Beschichtung eindringen kann. Die basische Substanz findet im Inneren einer Beschichtung eine recht große Angriffsfläche vor, was eine »effektivere« Wirkung hat, als wenn die gleiche Substanz nur an der Oberfläche angreifen kann.

Zahlreiche Polymerbeschichtungen vermögen gering konzentrierten Säuren ( $\geq \text{pH } 2$ ) in ausreichendem Maß zu widerstehen. Dies gilt eher für Mineralsäuren (z. B. Salzsäure) als für organische Säuren (z. B. Essigsäure), weil Letztere auf Polymere noch eine quellende Wirkung ausüben. Konzentrierte Mineralsäuren bewirken wegen ihrer oxydativen Wirkung zunächst eine Verfärbung von Gelb über Braun bis zu Schwarz und führen danach zu einer raschen Hydrolyse, d. h. zum Zersetzen der Polymermolekülstruktur.

Mit der Einwirkung entsprechend großer Hitze zersetzen sich organische Bindemittel in der Schrittfolge Vergilben, Molekülkettenabbau und Verbren-

nen. Eine Blasenbildung zeigt in dieser Folge an, dass aus Festkörpern gasförmige Stoffe entstanden sind. Die geringsten thermischen Beständigkeiten von Beschichtungen liegen bei etwa 80 °C – eine Temperatur, die bei Bauteilen durchaus auftreten kann. Nach Erreichen von 450 °C sind alle üblichen organischen Beschichtungen chemisch zersetzt (verbrannt), zumal, wenn diese Temperatur über mehrere Stunden einwirkt. Welche Temperatur von einer Polymerbeschichtung ertragen wird, hängt auch von der Dauer der thermischen Einwirkung ab. Entscheidend ist weiterhin, ob es sich um feuchte oder trockene Wärme handelt: Eine Epoxidbeschichtung auf Stahl kann kurzfristig durchaus bis 180 °C belastet werden, wenn die angrenzende Luft trocken ist. Die gleiche Beschichtung ist bei trockener Dauerwärmebeanspruchung höchstens mit 140 °C belastbar. Wenn eine feuchte Wärme oder gar heißes Wasser vorliegt, wird die gleiche Beschichtung nur eine Temperatur von ca. 75 °C ertragen können.

Eine gewisse Vorstellung vom Verhalten von Polymerbeschichtungen bei zunehmender Temperatur vermittelt Bild 124. Dargestellt ist, wie eine Epoxidbeschichtung bei steigender Temperatur durch Zersetzungsvorgänge allmählich ihre Masse verringert. Erste Substanzverluste der völlig ausgehärteten Probe waren bereits zwischen 100 und 200 °C festzustellen, ein nennenswerter Gewichtsverlust ist im Temperaturintervall zwischen 280 und 400 °C



**Bild 124** ■ Thermogravimetrische Analyse (TGA) einer Epoxidbeschichtung; In einer Schutzgasatmosphäre werden meist organische Bestandteile der Beschichtung zersetzt

erreicht worden. Mit dieser thermogravimetrischen Analyse [101] ist es z. B. möglich, den Bindemittelgehalt einer Beschichtung quantitativ zu bestimmen.

Eine gewisse Sonderstellung nehmen Siliconharze und Fluorkohlenwasserstoffharze ein, die bei trockener Wärme mit bis zu 500 °C belastbar sind.

### 3.8.3 Abwitterung

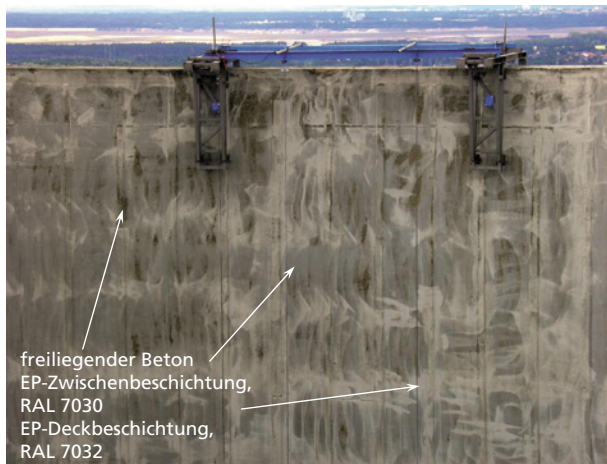
Unter dem Einfluss der Globalstrahlung (Sonnenlicht) wird das Polymerbindemittel einem fotochemischen Alterungsprozess ausgesetzt. Nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz steigt die Extinktion, d. h. der Widerstand, welcher der Globalstrahlung durch eine Beschichtung entgegengesetzt wird [102], mit zunehmender Entfernung von der Beschichtungsoberfläche an. Der Durchlassgrad nimmt für die Globalstrahlung dabei stetig ab. Daraus folgt, dass der fotochemische Abbauprozess der Polymermoleküle praktisch nur die Beschichtungsoberfläche betrifft. Dort sind es die energiereicheren kurzwelligen Anteile des sichtbaren und nicht sichtbaren Lichtspektrums – die sogenannte UV-Strahlung –, die versprödet und zersetzend wirken.

Beim Wischen mit der Hand über die bewitterte Oberfläche bleiben Pigmente, Füllstoffe und zersetzte Bindemittelteile daran hängen. Diesen Vorgang bezeichnet man als »Kreiden«. Es wurde bereits in Bild 122 dargestellt. Das Kreiden kann nach [30] quantitativ erfasst werden. Es ist bei organischen Polymerbindemitteln im Freien praktisch unvermeidbar, wenngleich zwischen Bindemitteltypen und Formulierungsvarianten beträchtliche Unterschiede vorliegen können. Dieser Vorgang kennzeichnet so lange keinen eigentlichen Schaden, solange die damit verbundene Schichtdickenabnahme die eigentliche Funktion der Schutzbeschichtung in der ihr zugeordneten Gebrauchstauglichkeitsperiode nicht beeinträchtigt. Der marginale Substanzabbau wird dann auch als sogenannter Selbstreinigungseffekt im kommerziellen Sinne genutzt, wenn dieser z. B. bei Gebäudefassaden im Zusammenhang mit der Beregnung eine gleichmäßige optische Vereinheitlichung als Folge eines gezielten Abtrags von Teilen der Beschichtung und Anschmutzungen bewirkt.

Wenn dieser stets von der Oberfläche ausgehende Verschleiß der Beschichtung zur Folge hat, dass wichtige, schichtdickenabhängige Eigenschaften der Beschichtung so weit verändert werden, dass ihre Funktion nicht mehr gewährleistet ist, ist das Stadium des systemischen Versagens der Beschichtung erreicht.

Bild 125 zeigt den Sonderfall des Zusammentreffens von Witterungsbeanspruchung und besonderer Betriebsbeanspruchung [103] mit den Folgen der Schädigung des Beschichtungssystems und des Betonuntergrunds, Letzteres durch Einwirkung von saurem Abgaskondensat [67].

**Bild 125** ■ Schaleninnenseite eines Naturzugkühlturms, in dem partiell gereinigte Rauchgase eingeleitet werden; das Zusammenwirken von Abgas-Nebelschwaden (NOX) und Globalstrahlung (UV) führt zu einem fotochemisch beschleunigten Schichtdickenabbau des Epoxid-Beschichtungssystems; an freiliegenden Betonflächen greift Abgaskondensat an



Die sogenannten Kreidungsraten, d.h. der Schichtdickenabbau, sind vom Typ des Polymerbindemittels abhängig. Man kann davon ausgehen, dass sich die Kreidungsrate bei den synthetischen Polymeren unter normalen Witterungsbedingungen in der Regel zwischen 1 und 3  $\mu\text{m}$  pro Jahr bewegt [89]. Wenn mit der Beschichtung der Selbstreinigungseffekt verfolgt wird, werden als Bindemittel besonders kontrolliert abbaubare Vinylharze und spezielle Pigmenttypen, z. B. Titandioxid Anatas, zum Einsatz gebracht. Im Falle der Sonderbeanspruchung von Kühltürmen im REA-Betrieb setzt man dagegen auf spezielle aliphatische PUR-Systeme mit hoher Resistenz gegen den fotokatalytischen Schichtdickenabbau [68].

Für die Exposition in normaler Land-, Wohn- und Industriatmosphäre sind Abwitterungsprozesse nicht nur durch die Globalstrahlung, sondern vor allem auch durch die Niederschlagseinwirkung, und dann insbesondere durch die Kombination der beiden Einflüsse geprägt. Dabei spielt sowohl die lösende und extrahierende Wirkung des Wassers eine Rolle als auch dessen schlagartig abkühlende Wirkung. Bei einem Gewitterregen können insbesondere bei dunklen Farbtönen kurzfristig Temperaturänderungen von 40 K eintreten. Langfristig entstehen dadurch in der Beschichtung Gefügeänderungen, die zur Versprödung, Rissbildung etc. führen können. Welche wichtige Rolle der Regen spielt, sei anhand von Bild 126 gezeigt.

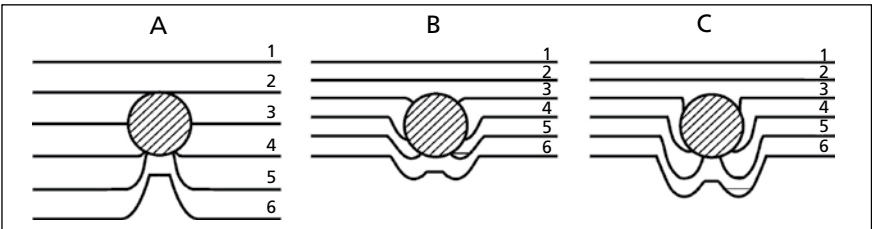
An Oberflächen von unpigmentierten Polymerschichten ist das Kreiden oder eine Glanzänderung als Folge einer Abwitterung meist nur schwach erkennbar. Bei pigmentierten Polymerschichten treten das Kreiden, eine Glanzänderung und meist eine Aufhellung stets intensiver in Erscheinung.





**Bild 126** ■ Abwitterung einer Fassadenbeschichtung, die an regengeschützten Teilflächen (dunkel) schneller abläuft als an regengeschützten Teilflächen (hell)

Der witterungsbedingte Oberflächenabtrag von Beschichtungen geht im Wesentlichen auf die Zerstörung des organischen Bindemittels zurück. Anorganische Pigmente und Füllstoffe werden dadurch an der Oberfläche freigelegt. Dabei können sich charakteristische Reliefs ausbilden. Bild 127 zeigt mit der Erscheinung A den Fall, dass ein wenig widerstandsfähiges Bindemittel und ein gut witterungsbeständiges Pigment zu einer Sockelbildung führen können. Auf dem Sockel steht das Pigmentkorn. Wird dagegen ein fotoaktives Pigment eingesetzt, bilden sich solche Sockel nicht aus (Erscheinung B). Bei entsprechend widerstandsfähigen Bindemitteln und fotoaktiven Pigmenten kann es sogar zur Muldenbildung kommen, wie dies die Erscheinung C zeigt.



**Bild 127** ■ Einfluss des Pigments auf den witterungsbedingten Bindemittelabtrag

### 3.8.4 Mechanischer Abtrag

Die Widerstandsfähigkeit von Polymerbeschichtungen gegen mechanischen Abtrag ist einerseits entscheidend von der Art der Beanspruchung, z. B. Begehen bzw. Befahren von Bodenbeschichtungen, andererseits von der mecha-

nischen Widerstandsfähigkeit und von der Schichtdicke einer Beschichtung abhängig.

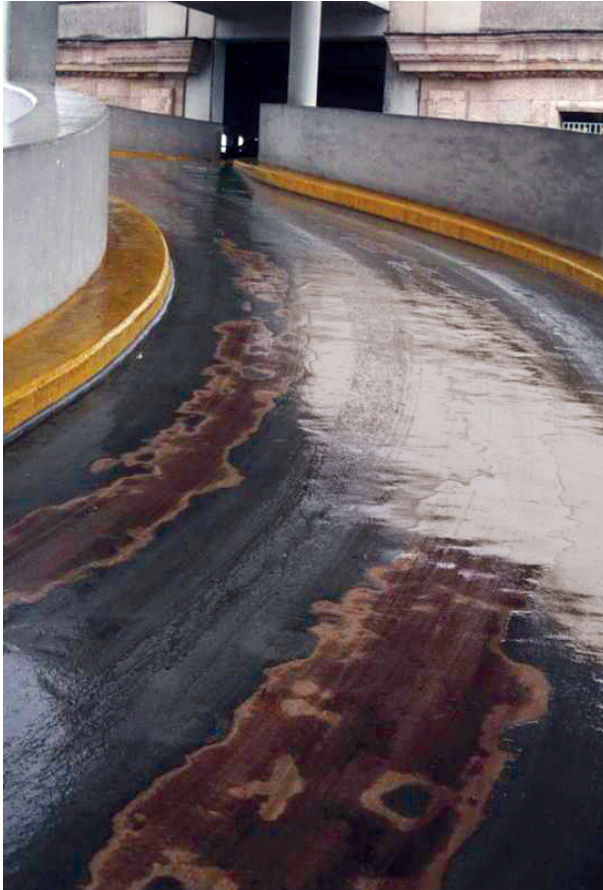
Die Beanspruchung auf **Abrieb** kann sehr verschiedenartig sein: Staubschliff bei Fahrzeugen auf Fußböden, Geschiebe und Geröll an Wasserbauwerken und in Rohrleitungen, Scheuern bei Reinigungsmaßnahmen, Begehen mit Schuhen usw. Mit anerkannten Prüfgeräten bzw. Prüfverfahren wie der Abriebprüfung nach Taber [31], [32] oder mit der Schleifscheibe nach Böhme [33] lassen sich Abtragsraten der Beschichtung ermitteln. Der Bezug zu einer individuellen Abriebbeanspruchung an einer realen Bauteilfläche ist jedoch problematisch.

Generell kann man sagen, dass plastomere Polymere, also Alkyde, Acrylate, Acetate etc., d. h. relativ weiche Bindemittel, weniger abriebfest sind als duromere Polymere, wie Epoxide, Polyurethane, polymerisierte Methylmethacrylate und andere spezielle Formulierungen [104].

Eine Steigerung des Abriebwiderstandes bewirkt man außerdem mit entsprechend widerstandsfähigen Füllstoffen wie Korund und Quarz. Beschichtungen haben in der Regel eine tiefenunabhängige Verschleißfestigkeit. Sie stehen diesbezüglich im Gegensatz zu Beton und Steinzeug: Beton besitzt eine Randzone von geringerem (siehe Bild 7), Steinzeug eine Oberflächenschicht von größerem Verschleißwiderstand als die tieferen Schichten.

Hinsichtlich des Einflusses der Schichtdicke auf die Abriebfestigkeit sollte man abhängig von der Beanspruchung gestaffelt verfahren. Der Fußboden eines Supermarkts (Geh- und leichte Fahrbeanspruchung) sollte bei Anwendung einer Epoxidbeschichtung mit einer Mindestschichtdicke (siehe Kapitel 4.2) von wenigstens 0,5 mm, der Fußboden einer Lager- bzw. Produktionshalle, in der mit Gabelstaplern gefahren wird, mit einer Mindestschichtdicke von 2 mm und darüber ausgestattet werden. Um damit eine 5-jährige Gewährleistungszeit zu überstehen, kann es durchaus notwendig werden, häufiger frequentierte Teilflächen eines Fußbodens stärker zu dimensionieren, durch Erhöhung der Schichtdicke oder Verwendung besonders verschleißfester Füllstoffe oder Zuschläge (z. B. Korund). Bild 128 zeigt die spindelförmige Auffahrt zu einem Parkhaus. Die Dimensionierung der Beschichtung erfolgte dort genau so wie auf den Stellplätzen des Parkhauses, obwohl die Frequentierung und vor allem die Scherbeanspruchung durch Antriebskräfte der Fahrzeuge an der Auffahrt ungleich größer sind. Dies hat nach kurzer Zeit zu beträchtlichen Abtragsraten in den Fahrspuren geführt.

Kommen zu der normalen Geh- und Fahrbeanspruchung noch schlagende Beanspruchungen hinzu, wie dies auf der Minigolfbahn (Bild 129) der Fall ist, bedarf es ebenfalls einer besonderen Bemessung (Verschleißzuschlag) der Beschichtung.



**Bild 128** ■ Durch intensive Fahrbeanspruchung (Scherwirkung) ausgelöster Abtrag der Deckschicht eines rissüberbrückenden Beschichtungssystems auf der Rampe eines Parkhauses



**Bild 129** ■ Unzureichend bemessene Schicht und Schichtdicke einer Bodenbeschichtung, die örtlich einer starken Schlagbeanspruchung ausgesetzt ist

## 4 Visuell nicht erkennbare Mängel

### 4.1 Vertragswidrige Beschichtungsstoffe

Die Entscheidung darüber, welcher Beschichtungsstoff an einem Bauwerk bzw. an einem bestimmten Bauteil zum Einsatz kommen soll, wird häufig nach dem Bindemitteltyp, z. B. Epoxid, Polyurethan oder Acrylat, getroffen [4], [5], [34], [35], [36], [37]. Für den Einsatz zum Schutz und der Instandsetzung von Betonbauteilen [3], [26], wurden neben der Vorgabe von Bindemitteltypen detaillierte Anforderungen zum Leistungsprofil und zur Stoffidentifikation aufgestellt.

Besteht Unklarheit darüber, ob der vorgegebene Beschichtungststofftyp zum Einsatz gelangt ist, dann lässt sich dies noch am ehesten am Nassmuster feststellen. Die spätere Identifizierung der Art der eingesetzten Beschichtungsstoffe bzw. eines bestimmten Produkts von Beschichtungsstoff an der am Bauobjekt vorliegenden Beschichtung ist meist sehr schwierig, wenn nicht gar unmöglich. Der Auftraggeber, häufig aber auch der Ausführungsunternehmer sind dazu in der Regel nicht in der Lage. Eine entsprechende Analyse erfordert Spezialkenntnisse und den Beistand eines darauf eingerichteten Labors.

Bei dem Versuch einer Beurteilung vor Ort wird man aus vielen Einzelmerkmalen erste Hinweise dafür suchen, ob der vom Auftraggeber geforderte Beschichtungsstoff tatsächlich verwendet wurde. Übliche Kriterien, die man als Vergleichsgrößen heranzieht, sind dabei:

- optische Erscheinung der Oberfläche,
- optische Erscheinung einer Schnittfläche,
- Flexibilität einer Spanprobe,
- Geruch an einer frischen Schnittfläche,
- Anzündversuch mit Geruchsprobe,
- Verhalten bei Einwirkung von Lösemittel,
- Verhalten bei Einwirkung von Wasser.

Die optische Beurteilung vor Ort sollte nicht nur mit dem bloßen Auge vorgenommen werden. Meist ist es sehr hilfreich, Oberflächenmerkmale mit der Lupe oder einem handlichen Kleinmikroskop zu betrachten.

Nach der Beurteilung vor Ort wird man dann zu entscheiden haben, ob Materialproben zur genaueren Untersuchung im Labor entnommen werden müssen. Bereits an kleinen Materialmengen können sowohl mit klassischen

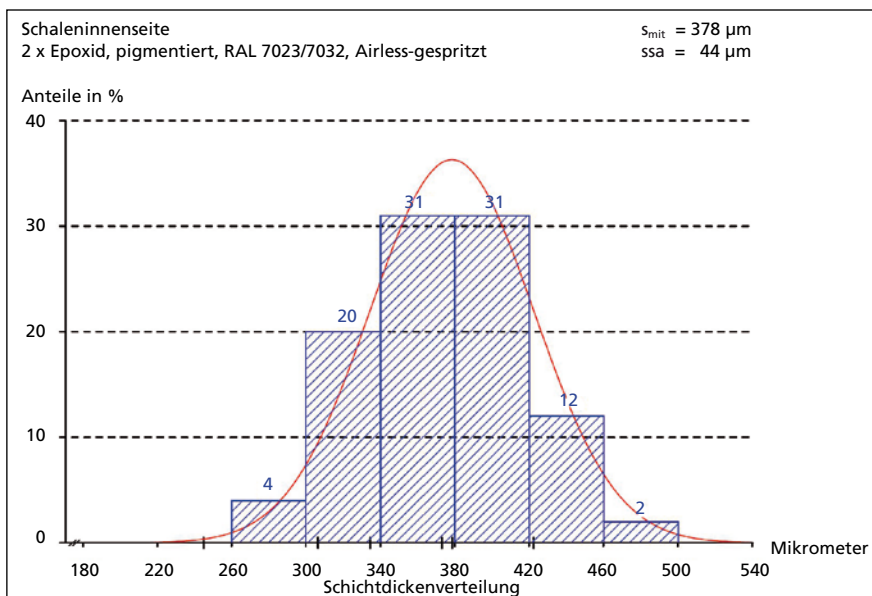
Methoden (z. B. Veraschungsrückstand) als auch unter Zuhilfenahme moderner Analysegeräte (z. B. Infrarot-Spektrometer) viele Informationen für eine Identifikation gewonnen werden. Gewarnt sei allerdings vor Beurteilungen, die alleine aufgrund von Laboruntersuchungen, ohne detaillierte Kenntnis der Verhältnisse vor Ort und ohne Kenntnis der ›Geschichte‹ des zu beurteilenden Objektes abgegeben werden.

## 4.2 Vertragswidrige Schichtdicken und Schichtaufbauten

Neben der Qualität des verwendeten Beschichtungsstoffs und dem zu erreichenden Verbund zum Untergrund ist die am Objekt erreichte **Trockenschichtdicke** ein weiteres wichtiges Kriterium für die Gebrauchstauglichkeit einer Polymerbeschichtung. Entgegen einer weitverbreiteten Annahme ist die Schichtdicke einer Beschichtung kein ›singuläres‹, sondern stets ein ›plurales‹ Ereignis: Nimmt man auf einer beschichteten Oberfläche eine Schichtdickenmessung vor, findet man niemals nur einen stets gleichen Zahlenwert für die Schichtdicke, sondern immer unterschiedliche, oft sogar sehr verschiedene Messwerte. Aus einer großen Zahl von Messerien ist bekannt, dass sich die Schichtdicken von Polymerbeschichtungen auf verschiedensten Untergründen und bei unterschiedlichen Auftragsverfahren nach der sogenannten Gauß'schen Normalverteilung anordnen [105]. Bild 130 zeigt in Histogrammform eine typische Verteilung der Schichtdickenwerte einer Polymerbeschichtung auf einem Betonbauteil. Dem Histogramm ist die idealisierte Kurve der Normalverteilung nach Gauß überlagert. Bereits visuell ist die gute Übereinstimmung erkennbar.

Je nachdem, welches Ziel mit einer Beschichtung verfolgt wird, muss aus dieser Verteilung derjenige **Schichtdickengrenzwert** abgeleitet werden, der für die Funktionserfüllung der Beschichtung maßgeblich und dann auch einzuhalten ist.

- Wenn der Korrosionsschutz von Stahl, der Schutz gegen chemischen Angriff oder der Verschleißwiderstand einer Bodenbeschichtung zu bemessen sind, wird man aus dieser Verteilung einen Grenzwert wählen, der am linken unteren Ende der Kurve angesiedelt ist.
- Wenn zu befürchten ist, dass Eigenspannungen einer Beschichtung infolge von Überschichtdicken zum Verbundverlust mit einem festigkeitsschwachen Untergrund führen, wird man einen Grenzwert am rechten oberen Ende der Verteilungskurve ansetzen.



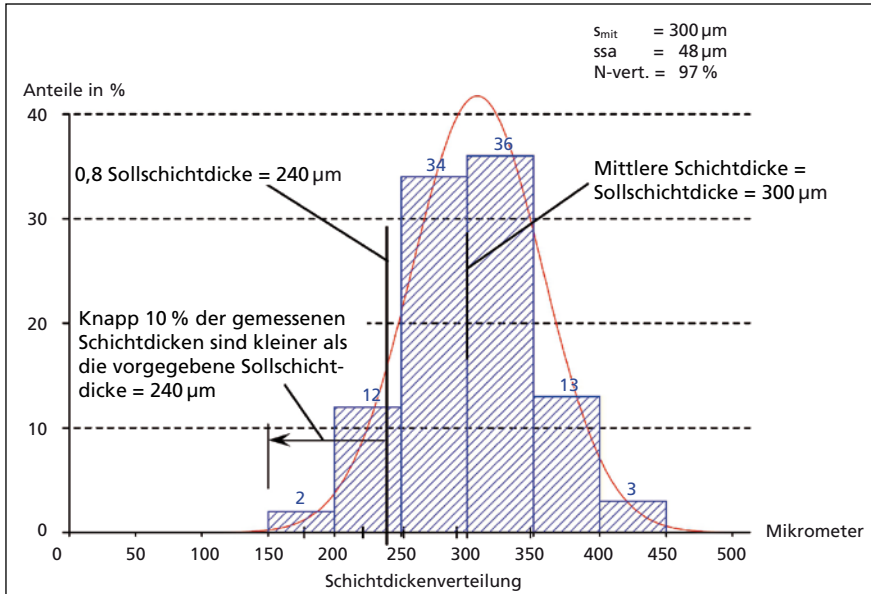
**Bild 130** ■ Ergebnis der Schichtdickenmessung an einer Kühlturm-Schaleninnenseite; die Schichtdickenverteilung entspricht der Gauß'schen Normalverteilung

- Wenn man die Auftragsmenge an Beschichtungsstoff kontrollieren will, ist der Mittelwert der Schichtdickenverteilung maßgeblich.
- Soll mit einer Beschichtung die Diffundierbarkeit von Wasserdampf oder Kohlendioxid gesteuert werden, wird der Grenzwert ebenfalls in den mittleren Bereich der Verteilungskurve gelegt werden müssen.

In DIN EN ISO 12944-5 BESCHICHTUNGSSOFFE – KORROSIONSSCHUTZ VON STAHLBAUTEN DURCH BESCHICHTUNGSSYSTEME [4], wird die sogenannte Sollschichtdicke (NDFT = Nominal Dry Film Thickness) definiert. Für diese gilt: *»Falls nicht anders vereinbart, sind Einzelwerte der Trockenschichtdicke, die 80 % der Sollschichtdicke unterschreiten, nicht zulässig. Einzelwerte zwischen 80 und 100 % der Sollschichtdicke sind zulässig, vorausgesetzt, dass der Mittelwert aller Messergebnisse gleich der Sollschichtdicke oder größer ist und keine andere Vereinbarung getroffen wird.«*

Stützt man sich auf erzielbare Schichtdickenverteilungen [106], dann ist diese Forderung praktisch nicht erfüllbar, denn es ist unter baupraktischen Bedingungen nicht möglich, den Mittelwert einer Normalverteilung – der ja der Sollschichtdicke nach obiger Definition entsprechen kann – um nicht mehr als 20 % zu unterschreiten. Dies veranschaulicht Bild 131.





**Bild 131** ■ Schichtdickenverteilung einer Korrosionsschutzbeschichtung auf Stahl, wobei für die Streuung optimale Bedingungen vorausgesetzt sind; wenn gemäß Definition [4] Sollschichtdicke = mittlere Schichtdicke sein kann, dann gelingt es unter baupraktischen Bedingungen nicht, die Schichtdickenabweichung nach unten auf 0,8 Sollschichtdicke zu begrenzen

In den Regelwerken ZTV-ING des BMVBS [26] und RL SIB des DAfStb [3] ist gleichlautend festgelegt, dass jeweils zwei system- bzw. produktspezifische Mindest- und Maximalschichtdicken eingehalten werden müssen. Des Weiteren ist dort eine Sollschichtdicke definiert, die aussagt, dass aufgrund statistischer Gegebenheiten sicherzustellen ist, dass die produktspezifische Mindestschichtdicke mit 95 %-iger Sicherheit an keiner Stelle unterschritten wird.

Unbefriedigend ist, dass die in DIN EN ISO 12944-5 [4] und die in den beiden Richtlinien ZTV-SIB [26] und RL SIB [3] jeweils gleichlautenden Begriffe der Sollschichtdicke unterschiedlich definiert sind. Aus technischer Sicht besteht kein Anlass, eine solche Unterscheidung vorzunehmen. Sie ist kontraproduktiv, wenn man bedenkt, dass gleiche Stoffhersteller, Planer und Ausführungsunternehmer in beiden Geschäftsfeldern (Korrosionsschutz, Beton-schutz) tätig sind, die dann mit unterschiedlichen Schichtdickendefinitionen konfrontiert werden.

Aufgrund dieser Gegebenheiten verbirgt sich hinter den Schichtdicken von Beschichtungen ein beträchtliches Potenzial an verdeckten Mängeln, wenn bei missverständlich und nicht abgestimmt formulierten Regelwerken oder

bei vom Auftragnehmer nicht nachvollziehbaren und auch nicht einhaltbaren Schichtdickenvorgaben eine Beschichtung angemessen beurteilt werden soll.

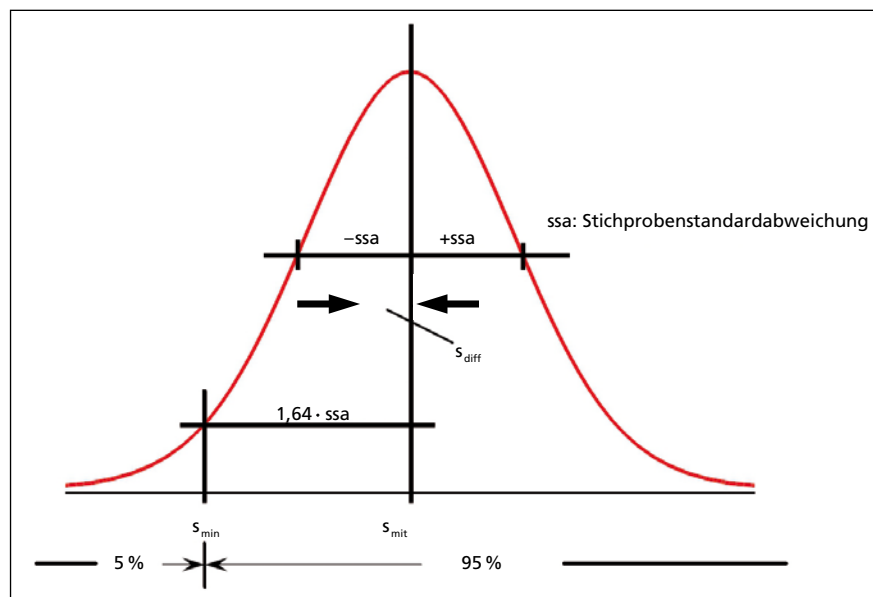
Anzustreben wäre eine Regelung, welche die Schichtdickendefinitionen der im Bauwesen relevanten Bereiche einheitlich abdeckt. Umfangreiche Untersuchungen und Betrachtungen über Polymerbeschichtungen zeigen, dass man bei den porösen Baustoffen (Beton, Estrich, Putz) mit zwei (2) und bei den nicht porösen Baustoffen (Metalle) mit einer (1) **Schichtdickendefinition** auskommt [81]. Bild 132 veranschaulicht die damit verbundenen Schichtdickengrenzwerte:

Auf der Basis einer Normalverteilung nach Gauß lautet deren Kurzdefinition wie folgt:

\* $s_{mit}$ : **mittlere Schichtdicke** (arithmetisches Mittel), verbunden mit der Vorgabe einer begrenzten Streuung um den Mittelwert. Bei Einhaltung einer begrenzten Streuung kann  $s_{mit}$  vereinfachend anstelle von  $s_{diff}$  zur Beurteilung von Diffusionsvorgängen im Schichtaufbau poröser Baustoff + Beschichtung herangezogen werden.

\* $s_{min}$ : **Mindestschichtdicke**, in der Definition der 5 %-Fraktile.

Unter Anwendung verfügbarer Maßzahlen als Parameter der Randbedingungen zum Beschichten [106] lässt sich eine Schichtdickenbemessung nach den

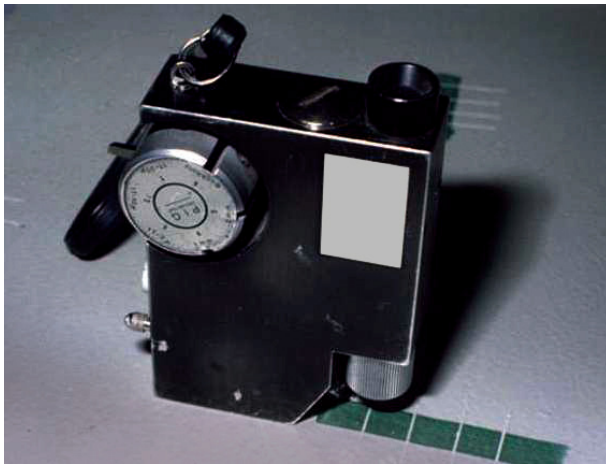


**Bild 132** ■ Schichtdickengrenzwerte, abgeleitet aus der Gauß'schen Normalverteilung

beiden Grenzwertvorgaben durchführen. In der RICHTLINIE FÜR MASSNAHMEN AN KÜHLTÜRME UND SCHORNSTEINEN AUS STAHLBETON [27] findet sich eine ausführliche Darstellung zur Definition und zu den Bemessungsgrundlagen von Schichtdicken, basierend auf den wissenschaftlichen Grundlagen der Grenzen der Standardnormalverteilung nach K. F. Gauß.

Beschichtungen bestehen in der Regel aus mehreren Lagen, die häufig auch aus verschiedenen Beschichtungsstoffen erzeugt werden. Auf diese Weise wird der beabsichtigte Zweck am sichersten und am einfachsten erreicht. Zum Beispiel muss bei Metallbeschichtungen die erste Lage den Korrosionsschutz gewährleisten, während die weiteren Lagen die Umgebungseinflüsse abschirmen und ästhetische Forderungen erfüllen. Bei mineralischen Baustoffen muss die erste Lage – oft als Grundierung bezeichnet – den Haftverbund zwischen dem Baustoff und der Beschichtung sicherstellen und das oft ungleichmäßige Saugen der Baustoffoberfläche egalalisieren. Ähnliches gilt für Holz. Da mineralische Baustoffe und auch Holz in dem von der Grundierung zu penetrierenden Porengefüge in der Regel adsorptiv gebundenes Wasser enthalten, müssen Grundierungen ein inertes Verhalten gegenüber Wasser aufweisen. Die von den Einzelschichten eines Beschichtungssystems zu erfüllenden Forderungen werden nur bei Einhaltung gewisser Schichtdicken optimal erfüllt, sodass die Kontrolle der Einzelschichtdicken in nicht wenigen Fällen ebenso sinnvoll ist wie die Kontrolle der Gesamtschichtdicke.

Mit den heute zur Verfügung stehenden Messgeräten ist insbesondere die zerstörungsarme Messung [38] von Gesamtschichtdicken aber auch die von Einzelschichtdicken auf jedem Untergrund und auch vor Ort möglich [81]. Bild 133 zeigt das handliche Messgerät PIG = Paint Inspection Gauge. Mit



**Bild 133** ■ Keilschnittgerät (PIG) zur Messung von Schichtdicken und Schichtaufbauten von Beschichtungen, insbesondere an realen Bauteiloberflächen

diesem Gerät ist es möglich, sowohl Gesamtschichtdicken als auch Einzelschichten von Gesamtaufbauten abzuzählen und deren Schichtdicken zu messen. Bei Beschichtungen auf Metallen ist sogar eine zerstörungsfreie Messung der Gesamtschichtdicke möglich [39], [40].

### 4.3 Vereinbarungswidrige Funktion der Beschichtung

Um Bauteile dauerhaft gegen äußere Einflüsse zu schützen, müssen die auf die Oberflächen aufzutragenden Polymerbeschichtungen bestimmte Schutzfunktionen haben. Eine Polymerbeschichtung besitzt meist mehrere solcher Funktionen, jedoch ist es in der Regel nicht möglich, eine Polymerbeschichtung mit allen Funktionen auszustatten. Welche Funktionen in einer Polymerbeschichtung vereint werden können, ist einerseits von wirtschaftlichen Gesichtspunkten, andererseits von der Art des zu beschichtenden Bauteils und letztlich von der Funktion selbst abhängig. In Tabelle 12 sind die für das Bauwesen wichtigsten sieben Funktionen von Beschichtungen den gebräuchlichsten fünf Untergründen zugeordnet.

Wenn ein beschichtetes Bauteil einer bestimmten Zeit der planmäßigen Beanspruchung, z. B. der Freibewitterung, ausgesetzt war, so wird das geschulte Auge in der Regel eine näherungsweise Beurteilung zum Verschleißwiderstand, zur Witterungsbeständigkeit und zur Korrosionsschutzwirkung vornehmen können.

**Tabelle 12** ■ Zuordnung der wichtigsten Schutzfunktionen von Beschichtungen, abhängig vom zu schützenden Untergrund

Untergrund	Funktion der Beschichtung						
	Carbonatisationsbremse	Feuchte-regulativ	Verschleiß-widerstand (mechanisch)	Witterungsbeständigkeit	Rissüberbrückung	Korrosionsschutz	chemische Belastbarkeit
Metall				X		X	X
Beton	X	X	X	X	X		X
Putz		X		X	X		
Estrich		X	X				X
Holz		X		X	X		

Wenn an der beschichteten Oberfläche Risse erkennbar sind (siehe auch Kapitel 3.5), die nur in der Beschichtung selbst aufgetreten sind, lässt sich eine Versagenszuordnung meist relativ einfach vornehmen. Liegen deckungsgleich Risse auch im Untergrund vor, muss von einem ursächlichen Zusammenhang zwischen der Beschichtung und dem Riss im Untergrund ausgegangen werden. Die damit verbundenen Gesetzmäßigkeiten und Vorgänge sind komplex und per Augenschein allein nicht aufklärbar [107], [108], [109]. Zuerst wird dann festgestellt,

- ob die vereinbarte Schichtdicke vorliegt (Kapitel 4.2).

Danach erheben sich die Fragen,

- ob die zum Zeitpunkt des Reißens der Beschichtung eingetretene Rissaufweitung bzw. die periodisch-dynamische Rissbreitenänderung im Untergrund größer bzw. intensiver war als es die Vereinbarung vorsah,
- ob die Beanspruchung der Beschichtung planmäßig war,
- ob eine vorzeitige Alterung [81] der Polymerbeschichtung zur Erschöpfung des Leistungsvermögens geführt hat,
- oder aber die Polymerbeschichtung das zugesicherte Rissüberbrückungsvermögen [3], [26] von Anfang an nicht aufgewiesen hat.

Tabelle 13 gibt einen Überblick über die Anforderungen, die man, abhängig von der vorgesehenen Beanspruchung, an Beschichtungen mit rissüberbrückender Wirkung stellt. Diese Anforderungen werden für entsprechende Beschichtungssysteme experimentell ermittelt und in den sogenannten Verwendungsnachweisen – meist bauaufsichtlichen Prüfzeugnissen – bestätigt.

Wenn es gelingt, am Bauobjekt entsprechende Verbundkörper (z.B. Bohrkerne, herausgetrennte Plattenkörper) zu entnehmen, kann das Rissüberbrückungsverhalten im Nachhinein bestimmt und mit dem vertragsgemäß vereinbarten verglichen werden [81]. Zur Durchführung einer solchen Funktionsprüfung bedarf es einer speziellen Versuchsanlage wie sie Bild 134 zeigt.

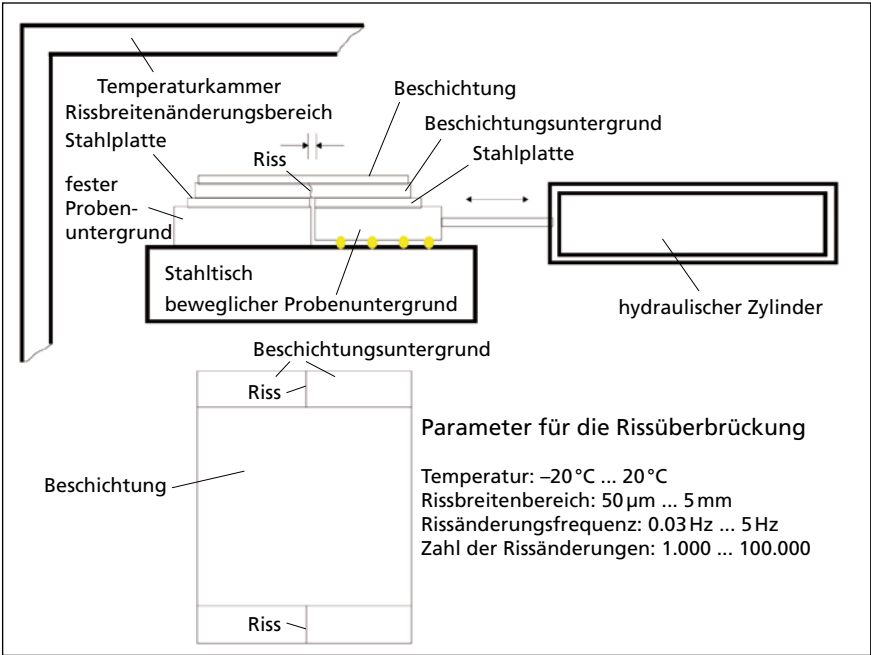
Wenn an einer beschichteten Betonoberfläche Schäden auftreten [58], obwohl eine Polymerbeschichtung mit angeblich carbonatisierungsbremsender Wirkung zur Anwendung gelangt ist [56], kann mit geschultem Auge am Betonschaden meist schon beurteilt werden, ob dieser durch eine Beschichtung überhaupt zu verhindern war. Ist eine solche Feststellung nicht zweifelsfrei möglich und kann auch die Überprüfung der Schichtdicke der Polymerbeschichtung (siehe Kapitel 4.2) noch keine Klärung schaffen, muss der dann ggf. vorliegende, visuell nicht erkennbare Mangel experimentell ermittelt werden.

**Tabelle 13** ■ Prüfbedingungen für flexible Beschichtungen mit rissüberbrückender Wirkung

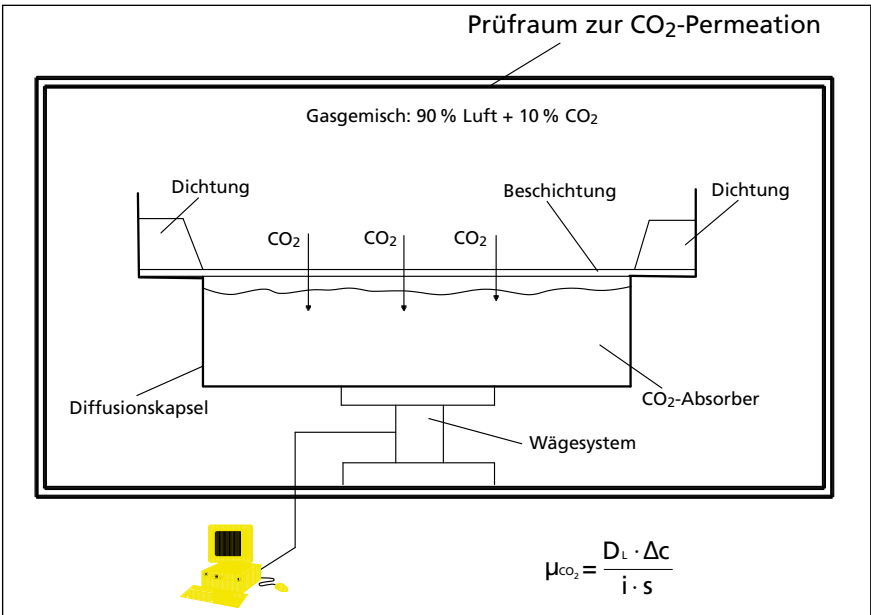
Beschichtungsart	Beanspruchung	Prüfbedingungen		
		Rissaufweitung w Rissweiten- änderung $\Delta w$	Lastwechsel	Temperatur
Abdichtung im Verbund [41]	Innenräume Schwimmbecken	w = 0,40 mm	1	+20 °C
		w = 0,75 mm	1	+20 °C
Bitumendick- beschichtungen [2]	Bodenfeuchte und nichtdrückendes Wasser	w = 2 mm	1	+20 °C
	drückendes Wasser	w = 5 mm	1	+20 °C
flexible Dichtungsschlämmen [42]	erdfeuchte und nichtdrückendes Wasser	w = 0,40 mm	1	+20 °C
Auffangwannenbeschichtungen [25]	diverse chemische Flüssigkeiten	w = 0,20 mm	1	+20 °C
Betonbeschichtungen RILI SIB, bzw. ZTV-SIB nicht begangen nicht befahren begangen und befahren [3], [26]	geringe RÜB erhöhte RÜB erhöhte RÜB und Verkehrslast	$\Delta w = 0,05$ mm	1.000	-20 °C
		$\Delta w = 0,20$ mm	1.000	-20 °C
		$\Delta w = 0,20$ mm	1.000	-20 °C
		überlagert mit $\Delta w = \pm 0,05$ mm	100.000	
rissüberbrückende Beschichtung von Kühlturmschalentrissen [27]	Kühlleistungsschwaden plus Abgaskondensat	w = 0,2 mm $\Delta w = \pm 0,1$ mm f $\geq 0,002$ Hz	1.000	-20 °C

Dazu bedarf es eines Verbundkörpers aus Beton plus Beschichtung sowie eines Probekörpers ohne Beschichtung. Beide müssen im Wege einer Kernbohrung am Bauobjekt entnommen werden. Die  $\text{CO}_2$ -Durchlässigkeit wird nach der in [110] beschriebenen, gravimetrischen Messmethode ermittelt, die zwischenzeitlich genormt ist [43]. Bild 135 zeigt das Kernstück des Messgerätes, die Diffusionskapsel, in welcher der zu prüfende Probekörper eingebaut wird. Die für die Beschichtung maßgebliche Materialkenngröße, die sogenannte Diffusionswiderstandszahl  $\mu_{\text{CO}_2}$ , wird nach Ermittlung der Stoffmengenstromdichte und Differenzbildung zwischen Verbundkörper und Be-





**Bild 134** ■ Versuchsanlage – Baupmodell Universität Dortmund zur Prüfung der Rissüberbrückungsfähigkeit



**Bild 135** ■ Gravimetrische Bestimmung der Diffusionswiderstandszahl  $\mu_{\text{CO}_2}$

tonprobekörper errechnet. Eine Zusammenstellung von weiteren Diffusionswiderstandszahlen für eine vergleichende Betrachtung findet man in [91].

Eine Beschichtung kann als Carbonatisierungsbremse bezeichnet werden, wenn ihre diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_{D,CO_2} \geq 50\text{ m}$  ist [56]. Zusammen mit der am betreffenden Bauobjekt bzw. am entnommenen Probekörper ermittelten Schichtdicke  $s_{mit}$  (siehe Kapitel 4.2) kann für den entnommenen Probekörper der Diffusionswiderstand nach folgender Gleichung

$$s_{D, CO_2} = \mu_{CO_2} \cdot s_{mit} \quad [\text{m}]$$

errechnet und der genannten Forderung gegenübergestellt werden.

Analog zu dem Beispiel der carbonatisierungsbremsenden Wirkung, die auf die diffusionsbremsende Wirkung der Beschichtung gegen  $CO_2$  zurückgeht, kann auch die Funktion der Polymerbeschichtung als Feuchteregulativ auf einfache Weise, d. h. durch visuelle Inaugenscheinnahme, nicht beurteilt werden. Ob ggf. ein verdeckter Mangel vorliegt, weil die Polymerbeschichtung Wasser nicht in angemessener Weise permeieren lässt bzw. am Durchgang hindert, kann an Polymerbeschichtungen und Baustoffen analog experimentell bestimmt werden [44]. Die Ermittlung der Flüssigwasseraufnahme wird nach [45] vorgenommen.

Von Interesse ist die Wirkung der Polymerbeschichtungen als Feuchteregulativ im Zusammenhang mit den porösen Baustoffen Beton, Putz, Holz und Estrich. Dabei wird in der Praxis oft die Frage diskutiert, ob und in welchem Maße Beschichtungen wasserdampfdurchlässig sein müssen, damit keine Schäden als Folge des ›Dampfdrucks‹ auftreten. Dazu kann ganz allgemein gesagt werden, dass ein Wasserdampfdruck im Sinne der Wirkung einer Kraft pro Fläche, mit einer daraus folgenden Zerstörung der Beschichtung, im Bauwesen nicht auftritt. In diesem Zusammenhang sei auch auf die Ausführungen in Kapitel 3.6.2 über die Ursachen der Blasenbildung in Beschichtungen verwiesen.

Für den weitverbreiteten Baustoff Beton sind die Diffusionswiderstände für Wasserdampf [111] von Betonteilquerschnitten deutlich größer als diejenigen der meisten Betonbeschichtungen, sodass das Diffusionsverhalten durch die Beschichtungen nicht signifikant verändert wird [112]. Rechnerische Abschätzungen zeigen zudem, dass ein Austrocknen von Betonbauteilen auch in Gegenwart von Beschichtungen mit nennenswertem Diffusionswiderstand immer noch möglich ist.

In einigen Ausnahmefällen kann es sich als günstig erweisen, Betonbauteile nur mit solchen Beschichtungen zu versehen, die als Folge von Diffusionsvorgängen eine Anreicherung von Wasser in der Grenzfläche zwischen Bau-

teil und Beschichtung nicht zulassen. Es könnte dort zu einer unzulässigen Quellung kommen, mit der Folge der Abminderung des Haftverbunds. Eine Anreicherung von Flüssigwasser in den Poren der oberflächennahen Betonzone unter einer Beschichtung könnte außerdem zu Schäden bei Frosteinwirkung führen.

Bild 136 zeigt die Kegelschale eines Stahlbeton-Trinkwasserturms. Aus trinkwasserhygienischen Gründen durfte auf der Innenseite der undichten Kegelschale keine polymergebundene Abdichtung angewendet werden. Örtliche Leckagen sind von außen dichtend injiziert worden. Im Betriebszustand liegt ein stationärer Wasserdampfdiffusionsstrom von innen nach außen vor. Als im Zuge von außenseitigen Instandsetzungsmaßnahmen dort eine Beschichtung mit carbonatisierungsbremsender Wirkung erforderliche wurde [113], ist eine bauphysikalische Abschätzung des noch zulässigen Wasserdampfdiffusionswiderstandes vorgenommen worden.

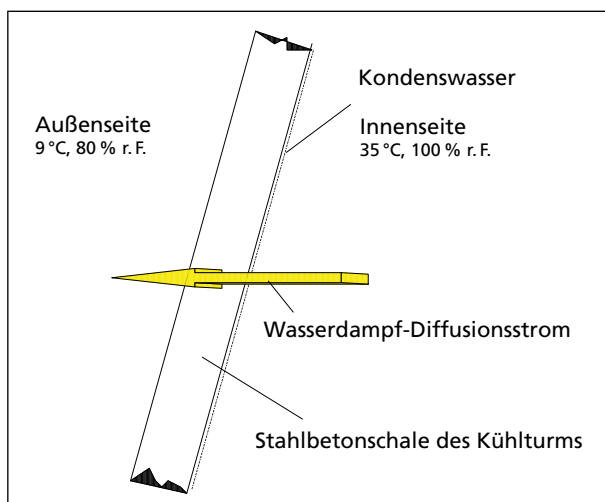


**Bild 136** ■ Trinkwasser-Hochbehälter; innenseitig ohne, außenseitig mit Beschichtung, erfordert besondere Betrachtungen zur Wassergehaltsverteilung in der Stahlbeton-Kegelschale des Behälters

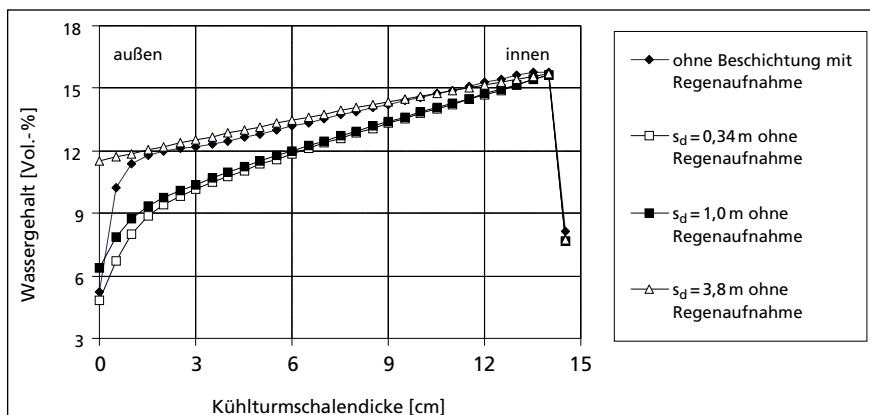
Rechnerische Simulationen ermöglichen darüber hinaus noch weitergehende Aussagen zur Wassergehaltsverteilung im Beton und zur Steuerung des Wasserhaushalts in Betonquerschnitten durch entsprechende Bemessung und Dimensionierung von Beschichtungen.

Bild 137 zeigt in schematischer Darstellung ausschnittsweise die Stahlbetonschale eines Naturzugkühlturms. Im permanenten Betriebszustand stellt sich ein Diffusionsstrom von innen nach außen ein. Wenn Beschichtungen erforderlich werden, ist eine rechnerische Simulation notwendig [114], um entscheiden zu können, mit welchen Diffusionswiderständen Schadenserscheinungen – wie oben angedeutet – abgewendet werden können. Bild 138 zeigt das Ergebnis einer rechnerischen Simulation der betriebsbedingten, instationären Wärme- und Feuchteeinwirkungen auf die Wassergehaltsverteilung in der Kühlturmschale. Zwei Beschichtungsalternativen ( $s_d = 0,34\text{ m}$ ,  $s_d = 1,0\text{ m}$ ) können als unkritisch, eine Beschichtungsalternative ( $s_d = 3,8\text{ m}$ ) muss unter den gewählten Randbedingungen als kritisch angesehen werden [115].

In den Regelwerken für die Betoninstandsetzung [3], [26] ist der zulässige obere Grenzwert für die Wasserdampfdiffusion bei der Anwendung von Beschichtungen auf Beton generell auf  $s_{D,H_2O} = 4\text{ m}$  festgelegt. Dies darf nicht dazu führen, dass dieser Grenzwert auf jeden Einzelfall angewendet wird. Wie anhand des beschriebenen Falls und der Darstellung in Bild 138 gezeigt ist, müssen bei bestimmten, insbesondere bei Wasserbauwerken (Kühltürme, Trinkwasserbehälter, Kanäle) ergänzende Betrachtungen und ggf. rechnerische Simulationen vorgenommen werden, um Schäden vom Bauwerk abzuwenden.



**Bild 137** ■ Schematische Darstellung der Wasserdampfdiffusion durch eine Kühlturmschale



**Bild 138** ■ Mittlere Wassergehaltsverteilung in der Betonschale eines Kühlturms, abhängig von der außenseitigen Beschichtung, Innenseite ohne Beschichtung

Im Regelwerk [3] wird im Teil 1 das Instandsetzungsprinzip W als Maßnahme zum Korrosionsschutz der Stahlbewehrung im Beton genannt. Es beinhaltet die Absenkung des Wassergehaltes im Beton, um somit elektrolytische Teilprozesse einer möglichen Stahlkorrosion zu unterdrücken. Entsprechend formulierte Beschichtungen können die Flüssigwasseraufnahme, und bei einem hohen Diffusionswiderstand temporär auch das Eindiffundieren von Wasser behindern, um auf diesem Weg das Betonbauteil trocken zu halten.

In der Annahme, dass in der gerade beschriebenen Kühlturmschale durch Simulation des Wasserhaushalts zwar Akzeptanz zur Vermeidung von Schäden in der Grenzzone Beton/Beschichtung erreicht worden ist, die Ausgleichsfeuchte in den Betonporen der äußeren Randzone jedoch immer noch zu hoch und deshalb korrosionsfördernd auf dort im carbonatisierten Beton liegende Bewehrungsstähle wirken, könnte des Prinzip W durch eine an der Schaleninnenseite applizierte Beschichtung den Wassergehalt an der Außenseite absenken.

Wie groß der auf der Schaleninnenseite anzuwendende Wasserdampfdiffusionswiderstand sein sollte, müsste wiederum durch rechnerische Simulation ermittelt und entsprechend Bild 138 dargestellt werden.

Diese für Beton angesprochenen Beispiele zeigen, dass bei den porösen Baustoffen im Zuge der Beurteilung einer Polymerbeschichtung die Frage der Funktion der Wasserdampfdurchlässigkeit bzw. des Wasserdampfdiffusionswiderstandes zu berücksichtigen ist, um klären zu können, ob evtl. ein Fehler bei der Bemessung vorliegt. Dies kann im Zusammenhang mit dem Wassertransport und auch im Falle der Kohlendioxiddiffusion nur dann erfolgen,

wenn die bautenschutztechnischen Wirkungen der Polymerbeschichtung (Barriere bei der  $\text{CO}_2$ -Diffusion, Durchlässigkeit bzw. Barriere beim Wassertransport) qualitativ und quantitativ bekannt sind.

In diesem Zusammenhang sei noch auf Untersuchungen verwiesen [81], die an Polymerbeschichtungen nach 1- bis 14-jähriger Freibewitterung durchgeführt wurden. Dort hat sich die Tendenz gezeigt, dass als Folge von natürlichen Alterungsvorgängen der  $\text{CO}_2$ -Diffusionswiderstand ab- und der  $\text{H}_2\text{O}$ -Diffusionswiderstand zunimmt. Die bisherigen bauphysikalischen Betrachtungen zur Wirksamkeit der Polymerbeschichtungen werden durch diese Erkenntnisse nicht infrage gestellt, insbesondere dann nicht, wenn die im Kapitel 4.2 gemachten Ausführungen zur Schichtdickendefinition beachtet und die Schichtdicken bei der praktischen Umsetzung eingehalten werden. Diese Erkenntnisse müssen jedoch bei der nachträglichen Beurteilung der Funktion der Beschichtungen beachtet werden, weil die dem Verwendungsnachweis zugrunde liegenden Vergleichsgrößen in Form von Diffusionswiderstandszahlen für  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  stets an weitgehend ungealterten Proben ermittelt werden.

## 4.4 Unzureichende Verbundfestigkeit

Grundsätzliche Voraussetzung dafür, dass Polymerbeschichtungen die ihnen zugeordneten Funktionen erfüllen können, ist ein ausreichender Haftverbund des Beschichtungssystems (Adhäsion) zum Untergrund und ein inniger Haftverbund (Kohäsion) zwischen den Einzelschichten. Eine visuelle Verifizierung dieser Anforderung ist am Bauwerk in der Regel nicht möglich. Letztendlich kann dies nur durch zerstörende Prüfungen erfolgen. Untersuchungen dazu werden deshalb bei der Erfolgskontrolle vermieden, wo immer es geht und wenn sie angewendet werden müssen, schränkt man ihren Umfang verständlicherweise soweit wie möglich ein. Weil der Haftverbund aus den verschiedensten Gründen (Besonderheit des Untergrunds, der Verarbeitung, der klimatischen Bedingungen etc.) örtlich deutlich verschieden ausfallen kann, birgt das verkürzte Prüfen Risiken in sich, weil mit nicht ausreichend repräsentativer Erfassung und bei nicht zufälliger Stichprobennahme keine verlässliche Aussage möglich wird.

Eine sehr weitverbreitete und in zahlreichen Regelwerken [3], [26], [46] verankerte Methode zur Prüfung des Verbunds ist der **Abreißversuch** zur Beurteilung der **Haftzugfestigkeit**. Unter Beachtung besonderer Randbedingungen werden dazu kreisrunde Stempel (meist aus Stahl) auf die Beschichtung aufgeklebt, die dann nach Verfestigung des Klebers mit einer Zugvorrichtung bei



stetigem Kraftanstieg abgezogen werden. Die Haftzugfestigkeit beim Bruch und die Lage der Trennebene kennzeichnen die Güte des vorhandenen Verbunds. Diese Methode ist relativ zeit- und kostenaufwendig, bezüglich des Ergebnisses ist ihre Definition aus physikalischer Sicht von allen sonst verfügbaren am präzisesten ( $\text{N/mm}^2$ ).

Die Bewertung der Kennzahlen eines Haftzugversuchs ist nicht unproblematisch. Einerseits erhält man sie, indem man senkrecht zur Beschichtungsoberfläche eine Spannung anlegt und diese bis zum Bruch stetig steigert. Verbundbelastend oder auch verbundschwächend sind im Laufe einer Alterung des Systems oder einer Beanspruchung nicht senkrecht zur Beschichtungsoberfläche angreifende Spannungen. Relevant sind vielmehr die in Richtung der Beschichtungsoberfläche angreifenden Scherkräfte durch alterungsbedingte Verkürzungsbestrebungen. Dazu wurden bereits in Kapitel 3.5, insbesondere im Zusammenhang mit Bild 64, einige Ausführungen gemacht.

Die an Bodenbeschichtungen durch Fahrzeuge beschleunigungs- bzw. bremsbedingt parallel zur Oberfläche angreifenden Scherkräfte wirken ebenfalls verbundbelastend.

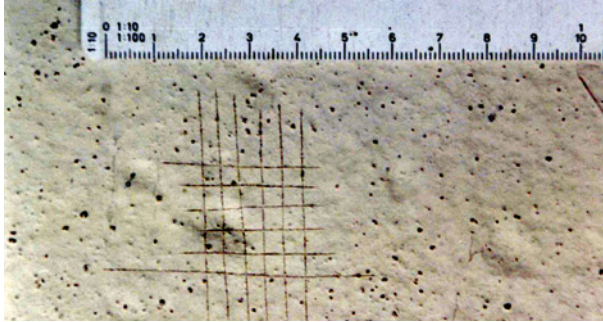
Eine verlässliche Korrelation zwischen der senkrecht zur Beschichtungsebene angreifenden Kraft des Abreißversuchs und der in situ in der Richtung der Beschichtungsebene angreifenden Alterungs- bzw. Nutzungsbeanspruchung ist nicht bekannt. Die in den Regelwerken verankerten Grenzwerte der Haftzugfestigkeit sind somit nicht an den tatsächlichen Erfordernissen, sondern meist danach ausgerichtet, was Beschichtungstyp und Untergrund 'hergeben'. Andererseits wäre die breite Anwendung einer Messmethode mit der Möglichkeit der Überprüfung des zulässigen Scherverhaltens auf alle Beschichtungstypen unverhältnismäßig aufwendig und kostenträchtig.

Die Anwendung der Verbundprüfung durch den Abreißversuch ist unabhängig der aufgezeigten Schwächen ohnehin nur dort vertretbar, wo ausreichend dickschichtige ( $s_{\text{mit}} > 500 \mu\text{m}$ ) und starr formulierte Beschichtungen vorliegen. Weil die entsprechenden Messgeräte an senkrechten Flächen nur schwer anwendbar sind – sie sollten dort eigentlich stets angedübelt werden – und weil der zur Ankopplung des Stempels an die Beschichtung zu verwendende Klebstoff im Flüssigzustand ein Anlösen bzw. Anquellen bewirkt, das insbesondere bei den durch physikalische Trocknung verfestigten Beschichtungen eine irreversible Beeinflussung hinterlässt, sollte ihre Anwendung – wenn überhaupt – auf horizontal liegende und auf dickschichtige, starre und chemisch vernetzte Beschichtungen beschränkt bleiben. Bild 139 zeigt die Versuchsvorrichtung in der Anwendung auf einer horizontalen Fläche.



**Bild 139** ■ Versuchs-  
vorrichtung zur Durch-  
führung des Abreiß-  
versuchs (Haftzug-  
festigkeit) an starren  
Bodenbeschichtungen,  
 $s_{\text{mit}} > 500 \mu\text{m}$

Bei **starr formulierten**, dünnsschichtigen Beschichtungen ( $s_{\text{mit}} < 500 \mu\text{m}$ ) beurteilt der Praktiker die Güte des Haftverbunds durch den sogenannten Gitterschnittversuch [23]. Bild 140 zeigt den Gitterschnittversuch an einer beschichteten Bauteilfläche. Nach der sechsteiligen relativen Bewertungsskala der Norm kann der Haftverbund beurteilt werden. Mit dem Gitterschnittversuch wird eine vorzügliche Korrelation zur tatsächlichen Verbundbelastung zwischen Untergrund und Beschichtung hergestellt, denn durch das Einschneiden der Raster wird die Beschichtung parallel zur Haftfläche schierend beansprucht. Ein gewisser Nachteil mag darin liegen, dass kein physikalisch definierter Kennwert wie bei der Beurteilung der Haftzugfestigkeit vorliegt. Die Aussagekraft des Untersuchungsergebnisses aus dem Gitterschnittversuch ist jedoch überzeugender.



**Bild 140** ■ Gitterschnittversuch zur Ermittlung des Haftverbundes von starren Polymerbeschichtungen,  $s_{\text{mit}} < 500 \mu\text{m}$

Bei **flexiblen** Beschichtungen kann der Haftverbund zwischen den Einzelschichten und zum Untergrund in situ sinnvoll nur in Anlehnung an den stationären Schälversuch z. B. nach DIN EN 1464:2010-06 durch den Spitzwinkelschneiderversuch [116] bewertet werden. Bild 141 zeigt schematisch die Anwendung dieses Haftverbundversuchs für flexible Beschichtungen.

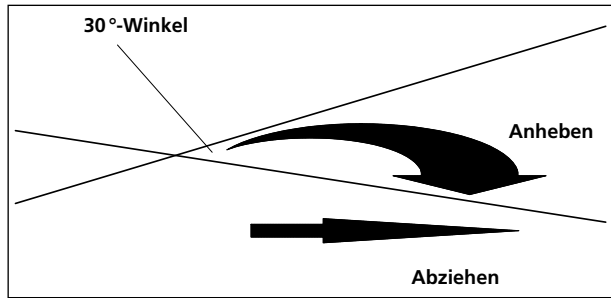
Die Klassifizierung wird durch drei Kennwerte vorgenommen:

- Sp 1 Größenordnung der abziehbaren Beschichtungsfläche:  $\text{mm}^2$ ,
- Sp 2 Größenordnung der abziehbaren Beschichtungsfläche:  $\text{cm}^2$ ,
- Sp 3 Größenordnung der abziehbaren Beschichtungsfläche:  $\text{dm}^2$ .

Uneingeschränkt positiv ist das Ergebnis, wenn der Kennwert Sp 1 erreicht wird, eingeschränkt kann der Kennwert Sp 2 akzeptiert werden. Wenn der Kennwert Sp 3 festgestellt wird, liegt ein Fehler, z. B. bei der Untergrundvorbereitung, vor.

Bild 142 zeigt die praktische Anwendung dieser Messmethode. Bemerkenswert ist die vergleichende Betrachtung zwischen dem Spitzwinkelschneiderversuch (für flexible Schichten geeignet) unten und dem Gitterschnittversuch (für flexible Schichten nicht geeignet) oben. Dass das Ergebnis des Gitterschnittversuchs scheinbar gut ausfällt – wogegen der Spitzwinkelschneiderversuch ein mäßig bis schlechtes Ergebnis anzeigt –, liegt daran, dass bei flexiblen Schichten wegen der Verformbarkeit der Beschichtung beim Einschneiden keine scherende Beanspruchung der Haftzone aufgebaut wird. Tatsächlich liegt ein mäßig bis schlechter Verbund vor, der durch eine unzureichende Untergrundvorbereitung verursacht worden ist. In diesem Fall sind an einer Sichtbeton-Fassadenfläche als Folge der starken Witterungseinwirkung in großer Gebäudehöhe (siehe dazu auch die Ausführungen in Kapitel 3.7.2) sandende Teile nicht vollständig abgetragen worden. Sie haften an der Rückseite der abziehbaren Beschichtung.

**Bild 141** ■ Schematische Darstellung des Spitzwinkelschneideversuchs



**Bild 142** ■ Rissüberbrückende Betonbeschichtung,  $s_{\min} \geq 300 \mu\text{m}$ ; Spitzwinkelschneideversuch zeigt schlechten (tatsächlichen), Gitterschnittversuch zeigt guten (vermeintlichen) Haftverbund an



Anhand von zwei Fallbeispielen sei noch auf visuell nicht erkennbare Mängel bezüglich einer unzureichenden Verbundfestigkeit aus zwei verschiedenen Verursachungen hingewiesen.

### Fallbeispiel 1

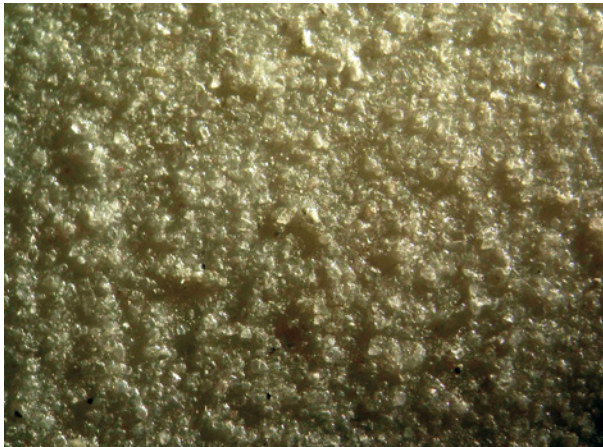
Auf die Innenseiten von Ringwand und Boden des Stahlbetonbeckens einer Kläranlage wurde ein rissüberbrückendes Polyurea(PUA)-Beschichtungssystem appliziert. Auf die Bodenfläche ist zuvor als Substrat eine EP-Flüssigharz-Kratzspachtelung aufgezogen worden. Das Klärwasser hatte eine Temperatur von  $30 \dots 35^\circ\text{C}$ . Nach einiger Zeit traten großflächige Beulen auf. Bild 143 zeigt einen Wandausschnitt mit beulenartigen Erhebungen. An intakt erscheinenden Flächen konnte die flexible, ca. 2 mm dicke PUA-Beschichtung bei Anwendung des Spitzwinkelschneideversuchs (siehe oben) in Form eines Adhäsionsbruchs großflächig (tapetenähnlich) abgezogen werden.

Die Beschaffenheit des dabei freigelegten Untergrunds ist in Bild 144 gezeigt. Sie ist geprägt durch eine sandkornraue, mit dem unpigmentierten EP-Flüssigharz umhüllte gezackte Oberfläche.

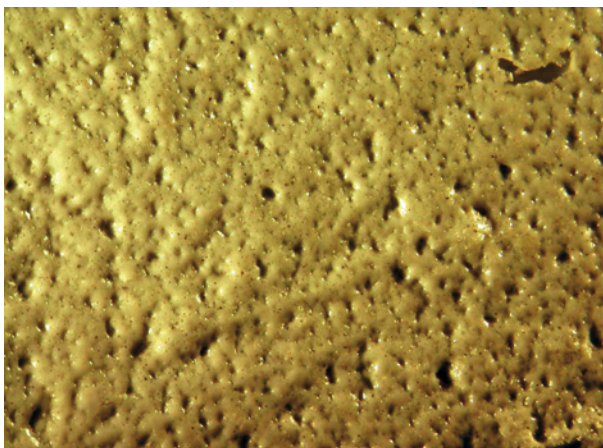
Die Beschaffenheit der Rückseite der PUA-Schicht zeigt Bild 145. Die Oberfläche ist nicht gezackt, sondern ausgerundet, d. h. bezüglich der Oberflächengeometrie nur sehr eingeschränkt identisch mit der Oberflächengeome-



**Bild 143** ■ Klärbeckenwand mit Beulenbildung in der PUA-Beschichtung



**Bild 144** ■ Quarzsand-geprägte Oberflächen-geometrie der EP-Grundbeschichtung



**Bild 145** ■ Ausgerundete Oberflächengeometrie der PUA-Beschichtungsrückseite



trie des Untergrunds. Darin liegt die Hauptursache der signifikanten Haftverbundschwäche, die auf großen Teilflächen visuell nicht sichtbar war. Sie geht im Wesentlichen darauf zurück, dass einerseits keine ausreichende Haftverbundaffinität zwischen EP-Grundbeschichtung und PUA-Deckbeschichtung vorlag und dass wegen des raschen Viskositätsanstiegs der schnell vernetzenden Deckbeschichtung keine hinreichende Benetzung möglich war. Daraus ergibt sich zwingend, dass der unzureichende Haftverbund schon vor Inbetriebnahme der Kläranlage vorhanden war. Eine ausführliche Beschreibung der für das Versagen verantwortlichen systemischen Fehler kann in [94] nachgelesen werden.

## Fallbeispiel 2

Bei der Erstellung eines Handelshauses sind die äußeren Umfassungswände mit Betonfertigteilelementen errichtet worden. Nach der Montage hat ein ortsansässiges Beschichtungsunternehmen eine Fassadenbeschichtung unter Verwendung einer Acryldispersion durchgeführt. Zwar war durch den Unternehmer die Tragfähigkeit des Untergrunds zu prüfen und, falls nicht vorhanden, mit einem entsprechend geeigneten Untergrundvorbereitungsverfahren herzustellen. Bild 146 zeigt einen Ausschnitt der Westfassade, die auch zwei Jahre nach Beschichtungsausführung keine sichtbaren Mängel aufwies. Bild 147 zeigt den »intakten« Zustand nach dieser Zeit in einer Detailaufnahme.

Mit dem Vorhaben des Bauherrn, an der Fassade eine farbliche Neugestaltung vorzunehmen, offenbarte sich eine Haftverbundschwäche der Beschichtung zum Beton. Bei der Anwendung des Gitterschnittversuchs [23] wurde der schlechtestmögliche Kennwert Gt 5 festgestellt. Es trat eine Adhäsionsent-



**Bild 146** ■ Ausschnitt der Westfassade des Bauobjektes



haftung zwischen Acrylbeschichtung und Fertigteil auf. Dabei wurde festgestellt, dass sich auf der Betonfertigteiloberfläche ein hellgrauer mehler Belag befand. Diesen Befund zeigt Bild 148.

Der im gerichtlichen Beweissicherungsverfahren beauftragte Gutachter kam zu dem Schluss, dass es sich dabei um Calciumcarbonat handle, welches sich nachträglich zwischen Beschichtung und Untergrund gebildet habe und welches dann den anfänglich guten Haftverbund aufgehoben habe. Untersuchungen sowie die Darlegung bauchemisch-bauphysikalischer Gesetzmäßigkeiten konnten zeigen, dass sich unter den gegebenen Voraussetzungen solche Schichten nachträglich nicht einstellen können und dass der haftverbundstörende, mehler Belag bereits bei der Fertigung der Betonfertigteile ent-



**Bild 147** ■ Teilfläche der Fassade mit scheinbar mängelfreier Beschichtung



**Bild 148** ■ Schlechtestmöglicher Gitterschnittkennwert Gt 5; pulvrige Schicht auf Beton lässt sich leicht abschaben

standen ist. Dies und die Beschreibung zur tatsächlichen Entstehung der Calciumcarbonatschicht kann unter [117] nachgelesen werden.

Es bleibt festzuhalten, dass auch dieser Fall zeigt, dass Mängel des Systems – hier der schlechte Verbund – visuell nicht stets und vor allem auch nicht zum Zeitpunkt der Leistungserbringung und der Leistungsabnahme ohne Weiteres wahrgenommen werden können.



# Literaturverzeichnis

## Normen, Regeln, Richtlinien

- [1] VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil B: Allgemeine Vertragsbedingungen für die Ausführung von Bauleistungen. Ausgabe 2009
- [2] Deutsche Bauchemie e.V. (Hrsg.): Richtlinie für die Planung und Ausführung von Abdichtung (KMB). Frankfurt am Main: Selbstverlag, 2010
- [3] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton im DIN e.V. (Hrsg.): DafStb-Richtlinie – Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungsrichtlinie). Berlin: Oktober 2001
  - Teil 1: Allgemeine Regelungen und Planungsgrundsätze
  - Teil 2: Bauprodukte und Anwendung
  - Teil 3: Anforderungen an die Betriebe und Überwachung der Ausführung
  - Teil 4: Prüfung
- [4] DIN EN ISO 12944-5:2008-01 Beschichtungsstoffe – Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme – Teil 5: Beschichtungssysteme (ISO 12944-5:2007); Deutsche Fassung EN ISO 12944-5:2007
- [5] DIN 18363:2010-04 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Maler- und Lackierarbeiten – Beschichtungen
- [6] DIN 32539:2010-03 (Entwurf) Flammstrahlen von Stahl- und Betonoberflächen
- [7] DIN EN ISO 8501-1:2007-12 Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen – Visuelle Beurteilung der Oberflächenreinheit – Teil 1: Rostgrade und Oberflächenvorbereitungsgrade von unbeschichteten Stahloberflächen und Stahloberflächen nach ganzflächigem Entfernen vorhandener Beschichtungen (ISO 8501-1:2007); Deutsche Fassung EN ISO 8501-1:2007
- [8] DIN EN ISO 12944-4:1998-07 Beschichtungsstoffe – Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme – Teil 4: Arten von Oberflächen und Oberflächenvorbereitung (ISO 12944-4:1998); Deutsche Fassung EN ISO 12944-4:1998
- [9] Korrosionsschutz durch Duplex-Systeme, Feuerverzinken + Beschichten. Institut für Feuerverzinken GmbH, Düsseldorf, 2000
- [10] DIN 50035-1:1989-03 Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien; Grundbegriffe
- [11] DIN 55945:2007-03 Beschichtungsstoffe und Beschichtungen – Ergänzende Begriffe zu DIN EN ISO 4618
- [12] DIN EN ISO 4628-1:2004-01 Beschichtungsstoffe – Beurteilung von Beschichtungsschäden – Bewertung der Menge und der Größe von Schäden und der Intensität von gleichmäßigen Veränderungen im Aussehen – Teil 1: Allgemeine Einführung und Bewertungssystem (ISO 4628-1:2003); Deutsche Fassung EN ISO 4628-1:2003
- [13] DIN 6164-1:1980-02 DIN-Farbenkarte; System der DIN-Farbenkarte für den 2°-Normalbeobachter
- [14] DIN 67530:1982-01 Reflektometer als Hilfsmittel zur Glanzbeurteilung an ebenen Anstrich- und Kunststoff-Oberflächen
- [15] DIN EN 13300:2002-11 Beschichtungsstoffe – Wasserhaltige Beschichtungsstoffe

- fe und Beschichtungssysteme für Wände und Decken im Innenbereich – Einteilung; Deutsche Fassung EN 13300:2001 + AC:2002
- [16] CIELAB, CIE (Commission Internationale l' éclairage, 1976 L\*, a\*, b\*), International Commission on Illumination
- [17] DIN EN 20105-A02:1994-10 Textilien – Farbechtheitsprüfungen – Teil A02: Graumaßstab zur Bewertung der Änderung der Farbe (ISO 105-A02:1993); Deutsche Fassung EN 20105-A02:1994
- [18] EG-Biozid-Richtlinie 98/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Februar 1998 über das Inverkehrbringen von Biozid-Produkten (Biozidgesetz)
- [19] Deutsche Bauchemie e.V. (Hrsg.): Zementgebundene Innenbeschichtungen in Trinkwasserbehältern. Frankfurt am Main: Selbstverlag, Oktober 2006
- [20] DIN EN ISO 12944-3:1998-07 Beschichtungsstoffe – Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme – Teil 3: Grundregeln zur Gestaltung (ISO 12944-3:1998); Deutsche Fassung EN ISO 12944-3:1998
- [21] DIN EN ISO 4628-4:2004-03 Beschichtungsstoffe – Beurteilung von Beschichtungsschäden – Bewertung der Menge und der Größe von Schäden und der Intensität von gleichmäßigen Veränderungen im Aussehen – Teil 4: Bewertung des Rissgrades (ISO 4628-4:2003); Deutsche Fassung EN ISO 4628-4:2003
- [22] DIN EN ISO 6272-2:2011-11 Beschichtungsstoffe – Prüfung der Widerstandsfähigkeit bei schlagartiger Verformung (Schlagfestigkeit) – Teil 2: Prüfung durch fallendes Gewichtstück, kleine Prüffläche (ISO 6272-2:2011); Deutsche Fassung EN ISO 6272-2:2011
- [23] DIN EN ISO 2409:2010-04 (Entwurf) Beschichtungsstoffe – Gitterschnittprüfung (ISO/DIS 2409:2010); Deutsche Fassung prEN ISO 2409:2010
- [24] Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz WHG). Bundesgesetzblatt, Teil 1 (1986)  
§ 48 Reinhaltung des Grundwassers  
§ 62 Anforderungen an den Umgang mit wassergefährdenden Stoffen  
Bundesgesetzblatt I 2009
- [25] Deutsches Institut für Bautechnik -DIBT- (Hrsg.): Bau- und Prüfgrundsätze Beschichtungen von Auffangräumen Bau- und Prüfgrundsätze für Beschichtungsstoffe zum Beschichten von Beton-, Putz- und Estrichflächen in Auffangwannen und Auffangräumen für die Lagerung von Heizöl EL, ungebrauchten Verbrennungsmotoren- und Kraftfahrzeuggetriebeöle sowie Gemische aus gesättigten und aromatischen Kohlenwasserstoffen mit einem Aromatengehalt von ≤ 20 Masse-% und einem Flammpunkt von > 55 °C. Fassung Februar 2009
- [26] ZTV ING – Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Dortmund: Verkehrsblatt-Verlag, April 2010
- [27] VGB PowerTech e.V. (Hrsg.): VGB-R612 – Richtlinie für Maßnahmen an Kühltürmen und Schornsteinen aus Stahlbeton zum Schutz gegen Betriebs- und Umgebungseinwirkungen. Essen: Selbstverlag, 2010
- [28] Bundesausschuss Farbe und Sachwertschutz -BFS- (Hrsg.): Brandschutzbestimmungen auf Holzwerkstoffen und Stahlbauteilen. Merkblatt Nr. 15. Frankfurt am Main: Selbstverlag, 1995
- [29] DIN EN ISO 4628-2: 2004-01 Beschichtungsstoffe – Beurteilung von Beschichtungsschäden – Bewertung der Menge und der Größe von Schäden und der Intensität von gleichmäßigen Veränderungen im Aussehen – Teil 2: Bewertung des Blasengrades (ISO 4628-2:2003); Deutsche Fassung EN ISO 4628-2:2003
- [30] DIN EN ISO 4628-6:2011-12 Beschichtungsstoffe – Beurteilung von Beschichtungsschäden – Bewertung der Menge

- und der Größe von Schäden und der Intensität von gleichmäßigen Veränderungen im Aussehen – Teil 6: Bewertung des Kreidungsgrades nach dem Klebebandverfahren (ISO 4628-6:2011); Deutsche Fassung EN ISO 4628-6:2011
- [31] ASTM D 4060:2010 Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser
- [32] DIN 53754:1977-06 Prüfung von Kunststoffen; Bestimmung des Abriebs nach dem Reibradverfahren
- [33] DIN 52108:2010-05 Prüfung anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe – Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Böhme – Schleifscheiben-Verfahren
- [34] DIN 18349:2010-04 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Betonerhaltungsarbeiten
- [35] DIN 18363:2010-04 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Maler- und Lackierarbeiten – Beschichtungen
- [36] DIN 18336:2010-04 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Abdichtungsarbeiten
- [37] DIN 18338:2010-04 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Dachdeckungs- und Dachabdichtungsarbeiten
- [38] DIN 50986:1979-03 Messung von Schichtdicken; Keilschnitt-Verfahren zur Messung der Dicke von Anstrichen und ähnlichen Schichten
- [39] DIN EN ISO 2178:1995-04 Nichtmagnetische Überzüge auf magnetischen Grundmetallen – Messen der Schichtdicke – Magnetverfahren (ISO 2178:1982); Deutsche Fassung EN ISO 2178:1995
- [40] DIN EN ISO 2360:2004-04 Nichtleitende Überzüge auf nichtmagnetischen metallischen Grundwerkstoffen – Messen der Schichtdicke – Wirbelstromverfahren (ISO 2360:2003); Deutsche Fassung EN ISO 2360:2003
- [41] Fachverband Fliesen und Naturstein im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V. (Hrsg.): ZDB-Merkblatt Verbundabdichtungen – Hinweise für die Ausführung von flüssig zu verarbeitenden Verbundabdichtungen mit Bekleidungen und Belägen aus Fliesen und Platten für den Innen- und Außenbereich. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, Januar 2010
- [42] Deutsche Bauchemie e.V. (Hrsg.): Richtlinien Abdichtungen mit flexiblen Dichtungsschlämmen. 2. Ausgabe. Frankfurt am Main: Selbstverlag, April 2006
- [43] DIN EN 1062-6:2002-10 Beschichtungsstoffe – Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Untergründe und Beton im Außenbereich – Teil 6: Bestimmung der Kohlenstoffdioxid-Diffusionsstromdichte (Permeabilität); Deutsche Fassung EN 1062-6:2002
- [44] DIN EN ISO 7783:2012-02 Beschichtungsstoffe – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit – Schalenverfahren (ISO 7783:2011); Deutsche Fassung EN ISO 7783:2011
- [45] DIN EN ISO 1062-3:1999-03 Beschichtungsstoffe – Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Untergründe und Beton im Außenbereich – Teil 3: Bestimmung und Einteilung der Durchlässigkeitsrate für flüssiges Wasser (Permeabilität); Deutsche Fassung EN 1062-3:1998
- [46] DIN EN ISO 4624:2003-08 Beschichtungsstoffe – Abreißversuch zur Beurteilung



lung der Haftfestigkeit (ISO 4624:2002);  
Deutsche Fassung EN ISO 4624:2003

## Bücher, Fachaufsätze

- [47] Kittel, H.: Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen. Bd. 2: Bindemittel für lösemittelhaltige und lösemittelfreie Systeme. 2., erw. u. neu bearb. Aufl. Stuttgart: Hirzel Verlag, 1998  
Kittel, H.: Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen. Bd. 3: Bindemittel für wasser verdünnbare Systeme. 2., erw. u. neu bearb. Aufl. Stuttgart: Hirzel Verlag, 2001
- [48] Kittel, H.: Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen, Bd. 4: Lösemittel, Weichmacher und Additive. Stuttgart: Hirzel Verlag, 2007
- [49] Krenkler, K.: Chemie des Bauwesens. Bd. 1: Anorganische Chemie. Heidelberg/Berlin/New York: Springer Verlag, 1980
- [50] Kittel, H.: Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen. Bd. 5: Pigmente, Füllstoffe und Farbmatrik. Hirzel Verlag, 2007
- [51] Ruf, J.: Korrosion. Schutz durch Lacke und Pigmente. Stuttgart/Berlin: Verlag W.A. Colomb, 1971
- [52] Plehn, W.; Kurzdörfer, U.: Verbraucher wollen umweltfreundliche Produkte. Farbe & Lack 105(1999), Nr. 7
- [53] Mayer, H.: Wässrige Silicon-Microemulsionen als Fassadenimprägniermittel. Farbe & Lack 97(1991), Nr. 4
- [54] Hager, R.; Hausberger, A.: Imprägniercreme – die Revolution im Betonschutz. Farbe & Lack 104(1998), Nr. 12
- [55] Engelfried, R.: Schadensdiagnose und Berechnungen als Entscheidungshilfen für Betonsaniermaßnahmen. Tl. 1 und 2. ZSW 9(1988), Nr. 1 und 2
- [56] Klopfer, H.: Bauphysikalische Aspekte der Betonsanierung. Bautenschutz und Bausanierung 3(1980), Nr. 4
- [57] Klopfer, H.: Schäden an Sichtbetonflächen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1993 (Schadenfreies Bauen; 3)
- [58] Engelfried, R.: Qualitätssicherung bei Oberflächenschutzsystemen auf Beton. Seminarhandbuch Betonangriff – Betonschutz – Betoninstandsetzung. Essen: Haus der Technik, 1997
- [59] Peiniger-Stiftung: Feuchtstrahlen (Pat.) auf Stahl. Leverkusen, 1983
- [60] Peiniger-Stiftung: Feuchtstrahlen (Pat.) auf Beton. Leverkusen, 1986
- [61] Engelfried, R.; Titze, B.: Planung, Bemessung und Ausführung von Oberflächenschutzmaßnahmen an den Kühlturbauten mit Rauchgaseinleitung im Kraftwerk Lippendorf. VGB Kraftwerkstechnik (1999), Nr. 12
- [62] Schäper, M.: Eigenschaften von Fertiger-Beschichtungen. Tagungsband Internationales Kolloquium 10. – 12. Januar 1995. Industriefußboden 95. Technische Akademie Esslingen
- [63] Engelfried, R.: Der Korrosionsschutz einer historischen Eisenkonstruktion. Bautenschutz und Bausanierung 17(1994), Nr. 7
- [64] Brock, T.; Groteklaes, M.; Mischke, P.: Lehrbuch der Lacktechnologie. Hannover: Vincentz Verlag, 1998
- [65] van Leeuwen, B.: Zum Filmbildungsmechanismus von Polymerdispersionen. Farbe & Lack 101(1995), Nr. 7
- [66] Klopfer, H.: Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen, insbesondere in Baustoffen, Kunststoffen, Beschichtungen. Wiesbaden/Berlin: Bauverlag GmbH, 1974
- [67] Engelfried, R.; Scharf, H.; Eisenkrein, H.: Konzeption von Ertüchtigungsmaßnahmen auf Schaleninnenseiten von Stahlbeton-Naturzug-Nasskühltürmen im Betrieb mit Abgaseinleitung. Tagungsband 1. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen, Januar 2009

- [68] Engelfried, R.; Eisenkrein, H. et al.: Technologischer Stand von Schutz- und Erhaltungmaßnahmen an Stahlbetonkühltürmen für die Betriebsarten ›Normal, Meerwasser, Abgaseinleitung‹ und für Stahlbetonschornsteine, gestützt auf das neue Regelwerk VGB 612, VGB Power-Tech, September 2001
- [69] Welker, S.: Farbe und Glanz simultan messen. Farbe & Lack 106(2000), Nr. 10
- [70] Zorll, U.; Römpf: Lexikon. Lacke und Druckfarben. Stuttgart/New York: Georg Thieme Verlag, 1998
- [71] Wagner, O.: Sauber bleiben. Anschmutzverhalten von wässrigen Fassadenfarben. Farbe & Lack 107(2001), Nr. 1
- [72] Bagda, E.; Vorrhein, M.: Zur Verschmutzung von Fassaden. Farbe & Lack 103(1997), Nr. 6
- [73] Rensmann, G.: Neue Klasse von Lackzusatzstoffen gegen Graffiti im Einsatz. Farbe & Lack 105(1999), Nr. 8
- [74] Wieandt, S.: Graffiti-Entfernung. Schnelle Reinigung ist wichtigste Reaktion nach Sprayer-Beschädigungen. Bautenschutz und Bausanierung (2000), Nr. 5
- [75] Wolf, L.; Heintz, A.: Beobachtungen über Wassergüterveränderungen durch Kunstharzanstriche von Wasserbehältern. Stadthygiene (1966), Nr. 3
- [76] Kollmann H.; Wolf, H.-D.: Fleckige Farbänderungen an Trinkwasserbehälter. Innenbeschichtungen. Bautenschutz und Bausanierung 19(1996), Nr. 2
- [77] Engelfried, R.: Beschichtung auf Sichtbeton-Fassadenelementen. Verfärbungen an Rissen und Fehlstellen. In: Zimmermann, G.; Schumacher, R. (Hrsg.): Bauschadensfälle. Bd. 2. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2002
- [78] Gieler, R. P.: Überlegungen und Versuche zur Rissüberbrückungsfähigkeit spezieller Beschichtungssysteme an Fassaden. Dissertation. Universität Dortmund, 1989
- [79] Homann, M.: Überlegungen und Versuche zur Rissüberbrückungsfähigkeit und Bemessung von Beschichtungssystemen für Industriefußböden. Dissertation. Universität Dortmund, 1997
- [80] Eisenkrein, H.; Engelfried, R.: Rissüberbrückungsfähigkeit viskoselastischer Betonbeschichtungen realitätsnah prüfen. Farbe & Lack 113(2007), Nr. 12
- [81] Engelfried, R.: Über den Einfluss der Schichtdicke und der Alterung auf die Wirksamkeit von Oberflächenschutzsystemen für Betonbauteile. Dissertation. Universität Dortmund, 2000
- [82] Engelfried, R.: Beherrschung der Schichtdickenproblematik durch Stoffhersteller, Planer und Ausführungsunternehmer. Tagungsband 4. Internationales Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen, 1996
- [83] Engelfried, R.: Kriterien zur Einhaltung der Schichtdicke bei rissüberbrückenden Bodenbeschichtungen. Tagungsband Industrieböden '99. 4. Internationales Kolloquium 12.–14. Januar 1999. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen, 1999
- [84] Hagen, H.; Rihm, K.-H.: Filiformkorrosion auf organisch beschichtetem Aluminium. Farbe & Lack 96(1990), Nr. 7
- [85] Näser, K.-H.: Physikalische Chemie. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1970
- [86] Engelfried, R.; Eisenkrein, H.: Blasenbildungen in Beschichtungen auf Beton und anderen porösen Baustoffen in statu nascendi der Beschichtung. Der Bausachverständige 5(2009), Nr. 3
- [87] Engelfried, R.; Eisenkrein, H.; Sage, F.: Naturzugkühlturm mit Abgaseinleitung. Planung und Umsetzung von Schutzmaßnahmen und Aussehensoptimierung. 2. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen, 2011

- [88] Ruf, J.: Organischer Metallschutz. Entwicklung und Anwendung von Beschichtungsstoffen. Hannover: Vincentz Verlag, 1993
- [89] Richter, M.: Einführung in die Farbmatrik. 2. Aufl. Berlin: Walter de Gruyter Verlag, 1981
- [90] Klopfer, H.: Anstrichschäden, Strukturen, Verhaltensweisen und Schadensformen von Anstrichen und Kunststoffbeschichtungen. Wiesbaden/Berlin: Bauverlag GmbH, 1974
- [91] Engelfried, R.: Diffusionswiderstandszahlen für Kohlendioxid und Wasser und deren praktische Anwendung. Farbe & Lack 89(1983), Nr. 7
- [92] Günther, M.: Beanspruchung und Beanspruchbarkeit des Verbundes zwischen Polymerbeschichtung und Beton. Dissertation. Karlsruhe: Universität Fridericianna, Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen, 1997
- [93] Wolff, L.: Mechanismen der Blasenbildung bei Reaktionsharzbeschichtungen auf Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 576. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2009
- [94] Engelfried, R.: Stahlbetonbecken einer Kläranlage in einem Hüttenwerk. Beulenartige Erhebungen der innenseitigen Schutzbeschichtung. In: Zimmermann, G.; Schumacher, R. (Hrsg.): Bauschadensfälle. Bd. 5. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2004
- [95] Klopfer, H.: Spannungen und Verformungen von Industriestrichen. Boden Wand Decke 34(1988), Nr. 3
- [96] Engelfried, R.: Gezielter Schutz für die Stahlbeton-Schornsteinmündung. VGB Kraftwerkstechnik 72(1992), Nr. 5
- [97] Worch, A.: Überlegungen und Versuche zur Erfassung des Wasserdampfübergangs an Bauteiloberflächen. Dissertation. Universität Dortmund, 2002
- [98] PZS-Berichte, PZSN2, 4/90. Statusbericht 89. Kernforschungszentrum Karlsruhe. Optimierung der Beschichtungsentfernung durch Kälteschockbehandlung
- [99] Engelfried, R. et al.: Verfahren zur Entfernung von Dekontbeschichtungen durch Mikrowellenbestrahlung. VGB Kraftwerkstechnik 74(1994), Nr. 11
- [100] Kommission »Carbonatisierung«: Carbonatisierung des Betons. beton (1972), Nr. 7
- [101] Mettler-Toledo: Thermogravimetrie für höchste Ansprüche. Firmeninformation Mai 1997
- [102] Hinzpeter, A.: Physik als Hilfswissenschaft. Tl. 5. Optik. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1971
- [103] Engelfried, R.; Busch, D.: Zustand von Kühlturminnenbeschichtungen als Folge der REA-Betriebsbelastungen und der Umfeldeinwirkungen. VGB Kraftwerkstechnik 76(1996), Nr. 1
- [104] Müller, M.: Hochleistungs-UV-Parkettlacke auf Basis ungesättigter Acryllacke. Farbe & Lack 107(2001), Nr. 4
- [105] Engelfried, R.: Schichtdicken von Beschichtungen auf Beton. Grenzwerte, Messung und Bewertung. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen (1995), Nr. 5
- [106] F+E-Bericht zur Darstellung von Schichtdicken von Beschichtungen auf Beton und Stahl. Universität Dortmund, Fakultät Bauwesen, Lehrstuhl Bauphysik, 1995
- [107] Klopfer, H.: Eine Theorie der Rissüberbrückung durch Beschichtungen. Tl. 1 und 2. Bautenschutz und Bausanierung 4(1982), Nr. 2 und 3
- [108] Gieler, R. P.: Eigenschaften rissüberbrückender Beschichtungen. Bautenschutz und Bausanierung 16(1993), Nr. 1
- [109] Homann, M.: Rissüberbrückende Industriebodenbeschichtungen. Bautechnik 75(1998), Nr. 12
- [110] Engelfried, R.: Carbonatisation von Beton, ihre Bedeutung und Beeinflussung

- durch Beschichtungen. defazet (1997), Nr. 9
- [111] Klopfer, H.: Feuchte. In: Lutz, P. et al.: Lehrbuch der Bauphysik. Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand, Klima. 4., neu bearb. u. erw. Aufl. Stuttgart: Teubner, 1997
- [112] Klopfer, H.: Bauphysikalische Betrachtung der Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen für Betonoberflächen. DAB 22(1990), Nr. 1
- [113] Engelfried, R.; Wittek, P.: Instandsetzung des Sichtbetons am Wasserturm Leverkusen. gwf Wasser Abwasser 140(1999), Nr. 2
- [114] Künzel, H. M. et al.: Praktische Beurteilung des Feuchteverhaltens von Bauteilen durch moderne Rechenverfahren. Freiburg / Brsg.: Aedificatio Verlag, 1999 (WTA-Schriftenreihe; 18)
- [115] Engelfried, R.: Permissible diffusion resistances of polymer coatings against water vapour and its diffusion effective film thickness. In: Proceedings of the 5th International Symposium on natural draught cooling towers. Istanbul May 2004, AA. Balkema Publishers, 2004
- [116] Engelfried, R.; Paul, G.: Oberflächen-schutzmaßnahmen am Reaktorgebäude (Sekundärabschirmung) eines Druckwasserreaktors. Bautechnik 76(1999), Nr. 7
- [117] Engelfried, R.: Haftverbundschwäche einer Beton-Fertigteilelemente-Beschichtung. Der Bausachverständige 4(2008), Nr. 1



# Stichwortverzeichnis

1 K-Beschichtungsstoff 20 f.  
2 K-Beschichtungsstoff 20 f., 61, 88,  
109, 134

## A

Abblättern 47, 49, 145 f., 148, 152 f.  
Ablagerung 46, 49 ff., 63 f., 66 f., 70, 93,  
111, 148  
Ablösen 51 ff., 147, 151  
Abperleffekt 28  
Abreißfestigkeit 31  
Abrieb 30, 52, 161  
Absacken 78  
Abschuppen 49, 145 f.  
Abtrag 33 f., 67, 83, 158, 160 ff.  
Abwitterungsprozess 159  
Acrylat 24, 29 f., 60, 92, 119, 152, 161, 163  
Additive 18 f., 130  
Adhäsionsbruch 103, 132, 141, 147, 181  
Affinität 81, 83, 147, 154, 183  
Agglomerat 77  
Airlesssspritzen 40 ff., 58, 77, 122, 136, 165  
Algizid 68  
Alkyde 23, 57, 74, 161  
Alterung 14, 23, 46 f., 56, 59, 61, 63, 74 f.,  
85, 88 f., 94, 155, 158, 170, 177 f.  
Amin 25, 27, 57 ff., 73, 130, 132  
Anisotropie 85  
Anschmutzung 46, 49 f., 64 f., 158  
Anstrich 11, 29, 43, 72  
Antigraffiti-Zusatz 67  
Applizieren 38, 81, 89, 120  
Auffalten 109  
Aufhellung 159  
Aufrauung 62  
Aufschüsseln 49, 51, 90, 145  
Auftragsmenge 21, 76, 89, 165  
Ausblühung 66

## B

Bakterizid 68  
Base 24 f., 27, 55, 64, 151, 156  
Basizität 29, 128  
Baustoffoberfläche 17, 21, 28, 31 f., 33,  
38 ff., 43, 47, 168

Bautenschutzmaßnahme 12  
Bauwerksunterhaltung 12  
Belag 50, 53, 64 ff., 70, 72 f., 97, 184  
Benard'sche Zelle 74 f.  
Benetzung 27, 38, 43, 55, 74, 76, 78, 80,  
148, 183  
Beschaffensvereinbarung 62  
Beschichten 11, 29, 31, 37 f., 43, 78, 80,  
108, 148, 167  
Beschichtung 11 f., 43 f., 46 f., 97 f.  
Beschichtung, flexible 101, 145, 171, 180  
Beschichtungsstoff 17 ff., 31, 38 f., 43 f., 50,  
74, 80, 83, 113, 147  
Beschichtungsstoff, vertragswidriger 163 f.  
Betondeckung 31  
Betoninstandsetzung 11, 29, 103, 175  
Betonschutz 11, 166  
Betriebsbeanspruchung 101, 124, 132 f.,  
154, 158  
Beule 49, 105, 139 ff., 181 f.  
Beulmechanismus 142  
Beutel 112  
Bewuchs 31, 49 ff., 58, 60 f., 68 ff.  
Bewuchs, organischer 49, 68  
Biegesteifigkeit 104, 124, 129  
Bindemittel 17 ff., 29 f., 44 ff., 55 f., 58 ff.,  
68, 70, 73, 88, 111, 124, 127 f., 148, 151,  
154 ff., 158 ff., 163  
Bitumen 24 f., 30, 56, 103, 171  
Blase 49, 92, 101, 104 f., 109 ff., 119 f., 122,  
144, 154, 157, 173  
Blasenflüssigkeit 128, 130 f., 134  
Blasenhohlraum 104, 132 ff.  
Blasenkeim 128, 130, 137  
Blase, osmotische 51, 124, 127 ff., 133, 136  
Bodenbeschichtung 11, 78, 80, 95 f., 101 ff.,  
139, 160, 162, 164, 178 f.  
Brechungsindex 59 f.  
Brown'sche Molekularbewegung 155  
Buntton 53  
Butadien 24

## C

Carbamatschicht 58  
Carbonatisierungsbremse 31, 169 f., 173 f.



Carbonatisierungstiefe 31  
Chromatografieeffekt 151  
CO<sub>2</sub>-Diffusion 177  
Copolymerisat 24, 30

## D

Dauerhaftigkeit 17, 19, 58, 62, 121  
Diffusion 15, 127, 167, 171 ff., 175  
Diffusionswiderstand 136, 173, 175 ff.  
Diffusionswiderstandszahl 171 ff.  
Dispersionsbeschichtung 45, 70 f.  
Druckluftspritzen 40, 43  
Druckluft-Trockenstrahlen 34  
Druck, osmotischer 125 ff., 136

## E

Eigenschaftsänderung 46 f., 155  
Einbaufertiger 42  
Einzelriss 84, 95  
Einzelschichtdicke 168  
Emulgatorhülle 44  
Energieelastisch 155  
Entlüftung 42, 81  
Entropieelastisch 155  
Entschalungshilfsmittel 66, 150  
Entschäumungshilfsmittel 110  
Epoxid 25 f., 30, 56 ff., 68 f., 73 ff., 81, 83,  
103, 109, 112, 138, 140, 155, 157, 159,  
161, 163, 165  
Erhärtungsschrumpf 27  
Ertüchtigungsmaßnahme 47  
Erweichung 24, 105, 154  
Ester 24, 27, 56  
Extinktion 158  
Extraktion 156

## F

Faltung 108  
Farbänderung 47, 53, 55, 57 f.  
Farbe 21, 29, 42 f., 49 f., 53 f., 55, 57, 59, 61,  
64, 72, 152  
Farbempfindung 53  
Feinspachtel 114  
Festharz 23, 25  
Feuchte 24, 26, 28, 30, 45 f., 51, 58 f., 63,  
68 ff., 85, 106 f., 115, 117, 122, 128, 134,  
149, 171, 175 f.  
Feuchteregulativ 169, 173

Feuchtstrahlen 33 f.  
Flächenleistung 38 ff.  
Flammstrahlen 33 f., 37  
Flechte 68, 72 f.  
Flugrostschicht 37  
Flüssigharz 18, 23, 25, 45, 139, 181  
Fluten 40, 42 f.  
Fotosynthese 72  
Fräsen 33, 37, 139, 144  
Freibewitterung 24, 76, 94, 156, 169, 177  
Frosteinwirkung 148, 174  
Frost-Tau-Wechsel 31  
Füllstoff 17 ff., 20 ff., 25, 27, 29, 44, 56, 59,  
63, 75, 77, 151, 158, 160 f.  
Fungizid 68  
Funktionsprüfung 170

## G

Gasblase 109, 111  
Gauß'sche Normalverteilung 164 f., 167 f.  
Gebrauchstauglichkeit 12, 14 f., 59, 62, 158,  
164  
Gefüge 21, 28, 110, 129, 144, 159, 168  
Gelpphase 80  
Gesamtaufbau 169  
Gesamtschichtdicke 94 f., 136, 168 f.  
Gewährleistungsfrist 12, 14  
Gießverfahren 42  
Gitterschnittversuch 89, 179 ff., 183  
Glanz 24, 26, 50, 53, 61 ff.  
Glanzänderung 47, 49, 50, 52 f., 61 ff., 159  
Glanzgrad 53, 61  
Glasübergangsbereich 155  
Globalstrahlung 55, 76, 158 f.  
Graffiti-Schutz 68  
Graumaßstab 53  
Großflächenapplikation 39  
Grundbeschichtung 103, 111, 131 ff.,  
139 f., 182 f.

## H

Haftfläche 26, 38, 43, 144, 147, 179  
Haftverbund 15, 18, 27, 32, 34, 44, 91 f.,  
103, 105 f., 109 f., 112, 124, 129, 132 f.,  
139, 143 ff., 153 f., 168, 174, 177, 179 ff.  
Haftzugfestigkeit 177 ff.  
Hammer-Klopf-Methode 146  
Hammer-Tast-Methode 146

Härterkomponente 21, 25 f., 122  
Härtung 21, 23, 25 ff., 29, 44 f., 74, 151, 155  
Helligkeitsänderung 49 f., 53, 55, 64  
Hilfsstoff 17 ff., 19  
Hochdruckwasserstrahlen 33 ff., 118  
Hochziehen 49, 108 f., 154  
Hohlklang 146  
Hohlraum 49, 51, 74, 78, 104 ff., 109 f., 112,  
122 f., 128, 132 ff.  
Holzinhaltsstoff 66, 106 f.  
Hydratation 29, 150  
Hydrolyse, basische 156  
Hydrophobie 68

## I

Imperfektion 49, 51, 73 f., 77 f., 94  
Impregnierung 11, 22, 28, 108, 119, 121  
Industrieatmosphäre 159  
Infrarot-Spektrometer 164  
Instandsetzungsprinzip W 176  
in statu nascendi 59, 104, 113  
Isocyanat 26, 57, 122

## K

Kalk 17, 29, 55, 66, 108, 156  
Kalksinterbelag 66  
Kantenflucht 81 f.  
Kapillarkraft 38, 151  
koaleszieren 44  
Kohäsion 22, 88, 104, 129 ff., 134 ff., 145,  
155, 177  
Kohäsionsbruchebene 134, 147  
Kohlendioxid 15, 26, 28 f., 58, 122, 165  
Kohlendioxiddiffusion 28, 176  
Konzept, bautenschutztechnisches 12  
Körperfarbe 53  
Korrosionsgefahr 98  
Korrosionsgeschwindigkeit 106  
Korrosionsprodukt 61, 64, 136 f.  
Korrosionsschutzpigment 17  
Kraftschluss, intermolekularer 147  
Krater 49, 78, 80  
Kreiden 47, 49, 52, 62, 158 f.  
Kreidungsrate 159  
Kreissriss 85  
Kugelstrahlverfahren 34, 139  
Kunststoffdispersion 61, 69 ff., 108, 110

## L

Lackfabrik 11  
Längenänderung, thermische 18, 142  
Lasurmittel 20  
Leinölalkyd 57  
Leistungsvermögen 12, 62, 170  
Lichtdurchlässigkeit 20  
Lichteinwirkung 57 f., 60, 72  
Lichtstabilität 27  
Linien-Rissschar 85  
Lösemittel 17 ff., 23 ff., 28, 40, 43 f., 45 f.,  
55 f., 58, 64, 109, 117, 121, 125 f., 128,  
132, 136, 147, 154, 163  
Lösemittelretention 88  
Luftsichtdicke 173

## M

Malerhandwerk 11  
Mangel 12 f., 15, 49, 96, 163, 166, 170,  
173, 181, 183, 185  
Materialprobe 163  
Mattierungsmittel 61  
Membran, semipermeable 125 ff., 130, 132,  
134, 136 f.  
Membrankraft 92  
Messung, zerstörungsarme 168  
Metallbeschichtung 128, 168  
Migrieren 63  
Mikroorganismus 68  
Mikroriss 47, 73  
Milchigwerden 49, 58  
Mindestschichtdicke 101, 132, 161, 166 f.  
Mischbruch 147  
Modifikation 22, 25 ff., 29  
Molekülstruktur 21 f., 63, 88, 156  
Monomer 23 f., 27  
Mulde 81, 160

## N

Nachhärtung 23  
Nassfilmdicke 88  
Nasshaftung 129  
Nassmuster 163  
Nominal Dry Film Thickness 165  
Nutzung 12, 14, 47 f., 51, 97

## O

Oberflächenfestigkeit 31  
Oberflächengeometrie 38, 80, 181f.  
Oberflächenimperfection 78, 83  
Oberflächenschutz 12, 22, 29f., 40, 42f., 48, 57, 89  
Objekttemperatur 76  
Oligomer 23f., 28  
Opferbeschichtung 67  
Orangenschaleneffekt 39  
Osmose 125, 129  
Overspray 78f.

## P

Paint Inspection Gauge 168  
Partialdruck 115  
Pfeffer'sche Zelle 125, 128  
Phase, physikalisch/chemisch 44f., 59, 80  
Phobie 147  
Pigment 17ff., 24f., 29, 44, 55f., 60ff., 68, 77, 151, 158ff.  
Pigmentvolumen-Konzentration 61  
Pilz 32, 46, 49f., 58, 60, 68, 70ff.  
pin blister 113, 119ff.  
pin holes 113f., 116ff.  
Pinselfauftrag 38f., 42  
Pinselfstrichmuster 38  
Plastomer 24, 63, 78, 80, 129, 161  
Platzwechseltheorie 148  
Polyester 26f., 56  
Polymer 17, 22f.  
Polymerisation 23f., 27  
Polymethylmethacrylat 27  
Polyol 26, 122  
Polyurea 27, 57, 75f., 181  
Polyurethan 26f., 30, 56, 113, 122f., 136, 161, 163  
Pumpwirkung 105  
Pustel 49, 105f., 108

## Q

Quellbarkeit 45

## R

Rauheit 33, 67, 73  
Regenschatten 64f.  
Reinheitsgrad 136f.  
Reinraumbedingung 137

Resistenz 25, 136, 159  
Riss 31, 49, 51f., 78f., 84ff., 145, 170, 172  
Rissbild 84  
Rissbreite 31, 87ff., 92, 97ff., 103, 170, 172  
Rissbreitenänderungscharakteristik 87, 98  
Rissnetz 84, 88ff.  
Rissquerschnitt 93  
Rissüberbrückung 15, 30, 58, 77, 96, 98, 100f., 103, 121, 169f., 172  
Rissverlauf 84, 93  
Riss, zügiger 85  
Rollenauftrag 38f., 42  
Rostunterwanderung 81  
Rückverformung 81, 105  
Runzeln 49, 74

## S

Sachmangel 13, 15  
Salzverunreinigung 106  
Sattdampfdruck 115ff., 119  
Sättigungsfeuchte 115f.  
Schadensform 15, 49ff., 105  
Schaumstruktur 49, 122, 124  
Scherbeanspruchung 103, 161  
Scherspannung 92  
Schichtdicke, mittlere 166f.  
Schichtdickenabbau, fotokatalytischer 159  
Schichtdickenbemessung 167  
Schichtdickendefinition 166f., 177  
Schichtdickengrenzwert 164, 167  
Schichtdickenmessung 164f.  
Schichtdickenverteilung 165f.  
Schichtdicke, vertragswidrige 164  
Schimmelpilz 58  
Schlagregenbeanspruchung 151  
Schleuderradstrahlen 144  
Schrumpfmaß 18  
Schrumpfspannung 27, 88  
Schutzfunktion 121, 169  
Schwinden 31, 74, 85, 96  
Sekundärabfall 35f., 137  
Selbstreinigungseffekt 158f.  
Silane 28  
Siliconharzfarbe 72  
Silicon-Mikroemulsion 28  
Siloxane 28  
Sinneseindruck 50, 61  
Sinterbelag 64, 66

Sollbruchstelle 92  
Sollschichtdicke 165 f.  
Sorptionisotherme 68 f.  
Spachtelschicht 37, 114  
Spannungsspitze 92, 95  
Spektralfarbe 59  
Spektralfotometer 53  
Spitzwinkelschneiderversuch 180 f.  
Spritzauftrag 40  
Spritznebel 40, 78  
Stachelwalze 42, 81  
Stammkomponente 21, 25 f., 122  
Standardnormalverteilung 168  
Statusüberprüfung 59  
Steighöhe 138  
Stoffidentifikation 163  
Strahlmittel 33 f., 36 f., 119, 136 f., 144  
Strukturviskosität 18  
Styrol 24, 27  
substanzabtragend 32  
substanzauftragend 38  
sweepen 34  
Symbiose 72

## T

Taupunkttemperatur 45, 149 f.  
Teilerneuerung 48  
Temperaturniveau 116 ff.  
Topfzeit 25, 80  
Totalerneuerung 47  
Total-Solid 79, 83  
Total Suspended Particulate 64  
Trockenschichtdicke 21, 137, 164 f.  
Trockenstrahlen 33 f., 37  
Trocknung 18, 44, 58, 78, 133 f.  
Trocknung, oxydative 23, 57  
Trocknung, physikalische 43, 75, 178  
Trübungen, neblige 122  
Trübung, weißliche 58 ff.

## U

Überdruck 51, 104, 110, 116 f., 121, 134, 136 f.  
Umfeldkontamination 39  
Unebenheit 40, 73, 101  
Untergrundvorbehandlung 38, 78, 101, 119, 133

Untergrundvorbereitung 32, 34, 37, 101, 108, 119, 133, 137, 144, 147, 152, 154, 180, 183  
Unterwanderung 112, 145  
UV-Strahlung 17, 46, 158

## V

Verbundfestigkeit 129, 177, 181  
Verbundversagen 49, 51, 145, 147 f., 151  
Verfälschung 19, 23, 29, 44, 63  
Verflüssigung 18  
Verformungsanteil, plastomerer 24, 78, 80, 129  
Verformungswiderstand 105, 116 ff., 121, 129  
Vergilbung 56 f., 61  
Vergrauung 60, 64  
Verlaufseigenschaft 42  
Vernetzung 26 f., 46, 58, 63, 75, 134, 136, 138  
Vernetzung, chemische 21, 25, 27, 44, 46, 78, 88  
Versagen, systemisches 47, 158  
Verschleißfestigkeit 161  
Verseifung 23, 27, 148, 156  
Versiegelung 11  
Versintern 29, 66, 108  
Verspröden 47, 49, 88, 155  
Verwendungsnachweis 100, 170, 177  
Verwitterungszustand 152  
Vinylacetat 24, 56  
Vinylchlorid 24, 56  
Vinylpropionat 24, 56  
Viskositätssteigerung 25, 81  
Volatile Organic Compounds 19  
Volumenänderung 85  
Volumenschwund 89

## W

Wärmeeinwirkung 57, 63, 105 f., 111, 136  
Wasserdampfdiffusion 174 f.  
Wasserdampfdiffusionswiderstand 136, 174, 176  
Wasserdampfdurchlässigkeit 176  
Wasserdampfkondensation 58, 149  
Wasserglas 17, 29 f.  
Wassermoleküle (Aktivität der) 115, 117 f., 126 ff., 136 ff.

Wasserrückhaltevermögen 71  
Wassertransport 176 f.  
Weichmacher 17, 23, 56, 63, 106  
WHG 94 f.  
Wirkstoffzusatz 68  
Witterungsbeanspruchung 31, 158  
Wölbspannung 143 f.

## **Z**

Zahnrakel 42  
Zersetzen 49, 52, 60, 155 f.  
Zinkcarbonatschicht 150  
Zustandsanalyse 31  
Zwischenschichthaftung 18

# Schadenfreies Bauen

Die Fachbuchreihe »Schadenfreies Bauen« stellt das gesamte Gebiet der Bauschäden dar. Erfahrene Bausachverständige beschreiben die häufigsten Bauschäden, ihre Ursachen und Sanierungsmöglichkeiten sowie den Stand der Technik. Die Bände behandeln jeweils ein einzelnes Bauwerksteil, ein Konstruktionselement, ein spezielles Bauwerk oder eine besondere Schadensart.

## Band 26

**Robert Engelfried, Helena Eisenkrein**

## Schäden an polymeren Beschichtungen

### 2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit den heutigen Erfordernissen, Bauwerke gegen Witterungseinflüsse und Nutzungsbeanspruchungen zu schützen, sind die Anforderungen an Anstriche und Beschichtungen bei Planung, Werkstoffherstellung und Anwendung deutlich größer geworden.

Dieses Buch, jetzt in vollständig aktualisierter und erweiterter 2. Auflage, gibt einen Überblick über die wichtigsten Beschichtungsstoffe, ihre Zusammensetzung und Eigenschaften, die wichtigsten Anwendungsregeln sowie ihre Verhaltensweisen unter praktischen Beanspruchungsbedingungen.

Anhand von Schadensbeispielen werden Ursachen und Mechanismen des Versagens von Anstrichen und Beschichtungen erläutert und daraus diejenigen Planungs- und Verarbeitungsfehler abgeleitet, die es zu vermeiden gilt. Einen besonderen Raum nehmen visuell nicht erkennbare Mängel ein, die nur auf analytischem bzw. technologischem Weg feststellbar sind.

### Die Autoren:

**Dr.-Ing. Robert Engelfried**, ö. b. u. v. Sachverständiger für Beschichtungen im Bauwesen und für die Betoninstandsetzung. Langjährig tätig in der anwendungsbezogenen Forschung und Entwicklung der Bauwerksuntersuchung sowie der Konzeption, Umsetzung und Qualitätssicherung von Instandsetzungs-, Bautenschutz- und Ertüchtigungsmaßnahmen. Untersuchung und Analyse von Fehlleistungen, Sachmängeln und daraus entstehenden Schäden. Mitarbeit bei der Erstellung von Richtlinien. Vorträge im In- und Ausland. Zahlreiche Fachpublikationen.

**Dipl.-Ing. Helena Eisenkrein**, geschäftsführende Gesellschafterin der IBOS GmbH, Institut für Betontechnologie und Oberflächenschutzsysteme, Tochter der ZERNA Baumanagement GmbH in Bochum. Mehrjährige Tätigkeit als Leiterin der Arbeitsgruppe Bauinstandsetzung mit einer Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle für Bauprodukte des Fachbereichs Architektur und Bauingenieurwesen der TU Dortmund. Tätigkeit als Sachverständige für Bautenschutz mit Schwerpunkt Betoninstandsetzung und Beschichtungen. Vorträge und Veröffentlichungen im In- und Ausland sowie Gremientätigkeit bei der Erstellung von Regelwerken.

ISBN 978-3-8167-8672-6



9 783816 786726