

Entwicklung von Prüfverfahren
für Oberflächenbehandlungen
von Stahlbeton zur Sanierung und
Verhinderung von Korrosionsschäden

F 2085

F 2085

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

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

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

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Gallus Rehm

7000 STUTTGART 80 (VAHNINGEN)
Pflaffenwaldring 4
Fernsprecher (0711) 685-1

31.08.1987

Entwicklung von Prüfverfahren für Oberflächenbehandlungen
von Stahlbeton zur Sanierung und Verhinderung von Korrosionsschäden

von

W.Hensel

G.Lange

Ergebnisbericht zu dem vom Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen
und Städtebau unter dem Az.: B I 5 - 80 01 77 34 geförderten
Forschungsvorhaben.

Unser Zeichen: D2/95 432

Der Bundesminister für Wohnungsbau

(Abteilung für Wohnbau, Wohnungsforschung)
Sammlung der Forschungsberichte des Referats

Az.: _____

Dtgs: 12.11.87

Sammlung der
Forschungsberichte
des Referats

Nr. 2085

Einleitung

Die Oberflächenbehandlung eines der Witterung ausgesetzten Stahlbetons im Rahmen einer Sanierung - insbesondere eine Endbeschichtung - soll üblicherweise neben dem optischen Erscheinungsbild in erster Linie die Diffusionseigenschaften des betreffenden Bauteiles - vor allem der zwischen behandelter Oberfläche und Bewehrung liegenden Schichten - so beeinflussen, daß sowohl ein günstiges bauphysikalisches Verhalten hinsichtlich des Feuchtigkeitshaushaltes als auch ein Korrosionsschutz für die Bewehrung in Form einer Sperrwirkung gegen Atmosphärenteilchen erzielt wird.

Eine besondere Rolle spielt dieser Problemkreis im Bereich von Fassaden einschließlich Sockeln sowie von nichtbefahrenen Verkehrsflächen. Der vorliegende Bericht nennt zunächst die wesentlichen Ursachen für unmittelbare und Folgeschäden am Stahlbetonbauwerk, die eine - ggf. vorbeugende - Sanierung einschließlich Oberflächenbehandlung des ursprünglich witterungsbeständigen Baustoffes Stahlbeton erforderlich machen können. Daran anschließend wird der Arbeitsvorgang einer Sanierung allgemein dargestellt. Nach Beschreibung der in Verbindung mit Folgeschäden im schadhafte Stahlbeton ablaufenden chemischen Reaktionen werden die Anforderungen an die Materialien zur Betonsanierung unter besonderer Berücksichtigung der Oberflächenbehandlung zusammengestellt. Abgestimmt auf diese Anforderungen werden Labor-Prüfverfahren für Materialien zur Oberflächenbehandlung angegeben.

Inhaltsverzeichnis

1. Stahlbetonsanierung
 - 1.1 Ursache für Schäden an Stahlbetonbauwerken
 - 1.2 Anwendungsgebiete und prinzipieller Aufbau von Betonsanierungssystemen
2. Chemische und elektrochemische Reaktionen
 - 2.1 Korrosion des Bewehrungsstahls
 - 2.2 Chemische Reaktionen des Zementleims bzw. des Zementsteins beim Anmachen und Erhärten des Betons
 - 2.3 Mögliche chemische Reaktionen von Atmosphärenteilchen mit zementgebundenen Baustoffen
 - 2.3.1 Chemische Reaktion des Zementsteins mit Kohlendioxid (CO_2)
 - 2.3.2 Chemische Reaktionen des Zementsteins mit Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO, NO_2) in Verbindung mit Sauerstoff (O_2)
 - 2.4 Korrosionsschutzwirkung des Zementsteins durch Korrosion mit Atmosphärenteilchen
3. Anforderungsprofil für ein Betonsanierungssystem
 - 3.1 Anforderungsprofil für die Betonsanierungsmaterialien (Endbeschichtung ausgenommen - s. Abschn. 3.2)
 - 3.1.1 Eigenschaften
 - 3.1.2 Randbedingungen
 - 3.2 Anforderungsprofil für Endbeschichtungen
 - 3.2.1 Eigenschaften
 - 3.2.2 Randbedingungen

4. Bewertungskriterien

4.1 Farbechtheit

4.2 Verschmutzungsanfälligkeit, Neigung zu Bewuchs

4.3 Augenscheinliche Veränderungen der Struktur

4.4 Abwitterung

4.5 Haftung auf dem Untergrund

4.6 Bauphysikalisches Verhalten hinsichtlich des Feuchtigkeitsaushaltes

4.6.1 Wasseraufnahme

4.6.2 Wasserdampfdiffusion

4.7 Durchlässigkeit gegenüber Gasen

4.7.1 Diffusion von Kohlendioxid

4.7.1.1 Diffusion von Kohlendioxid ohne gleichzeitige Wasserdampfdiffusion

4.7.1.2 Diffusion von Kohlendioxid bei gleichzeitiger Wasserdampfdiffusion

4.7.2 Diffusion von Sauerstoff

4.8 Durchlässigkeit gegenüber Chloriden

4.9 Dehnfähigkeit im Reißbereich

4.10 Lieferqualität

4.10.1 Farbton

4.10.2 Viskosität

4.10.3 Dichte

4.10.4 Nichtflüchtige Anteile und Glührückstand

4.10.5 Bindemitteltyp

4.10.6 Festkörpervolumen

4.11 Lagerfähigkeit

4.12 Verarbeitbarkeit

5. Beanspruchung vor Bestimmung von Bewertungskriterien
 - 5.1 Xenonbogenbestrahlung mit Beregnen
 - 5.2 Kondenswasser-Konstantklima
 - 5.3 Frost-Tau-Wechselbeanspruchung
 - 5.4 Wärmebeanspruchung
 - 5.5 Kondenswasser-Wechselklima
 - 5.6 Freibewitterung
6. Beurteilung
7. Durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse
 - 7.1 Imprägnierungen
 - 7.2 Versiegelungen
 - 7.3 Beschichtungen
 - 7.3.1 Anorganische Beschichtungen
 - 7.3.2 Organische Beschichtungen
8. Zusammenfassung
9. Weitere Zielvorstellungen
10. Literaturverzeichnis
11. Anlagen

1. Stahlbetonsanierung

1.1 Ursache für Schäden an Stahlbetonbauwerken

Stahlbeton ist ein Verbundbaustoff aus Beton und Stahl, in dem sich die Druckfestigkeit des Betons und die Zugfestigkeit des Stahles günstig ergänzen. Der Beton ist dabei ein Zweistoffsystem mit den Komponenten Zuschlag und Zementstein. Außer der Übertragung von Spannungen hat der Beton bei unbeschichtetem Stahlbeton aber auch den Korrosionsschutz für die Bewehrung zu übernehmen, soweit diese nicht selbst durch geeignete Maßnahmen (z.B. Schutzüberzug; s. /1.1.1/) gegen Korrosion geschützt ist. Daraus folgt, daß weder Zementstein noch Zuschlag korrosionsfördernde Bestandteile enthalten dürfen oder höchstens in unterkritischen Konzentrationen (s.a. DIN 1164 Teil 1 und DIN 1045). Der Beton selbst ist dann - soweit einwandfrei verarbeitet - gegen die hier behandelten chemischen Angriffe i.a. ausreichend widerstandsfähig.

An Schadstellen ist jedoch das günstige Zusammenwirken von Beton und Stahl bezüglich Tragverhalten und Korrosionsschutz gestört. Bereits bei der Planung eines Stahlbetonbauwerkes können Fehler unterlaufen, die dann später zu derartigen Schäden am Bauwerk mit Folgen für Standsicherheit und Dauerhaftigkeit führen. Als mögliche Planungsfehler seien hier ein hinsichtlich der Baugrundverhältnisse ungünstiges statisches Grundsystem sowie eine ungenügend durchdachte Formgebung und Bewehrungsführung bei hochbeanspruchten Bauteilen erwähnt. Wird die Erstellung eines Bauwerkes nicht überwacht, können durch Mängel in der Ausführung ebenfalls Schwachpunkte entstehen. Insbesondere architektonisch anspruchsvolle Bauwerke in Ort betonweise erfordern ein hohes Maß an handwerklichem Können und Sorgfalt beim Schalungsbau, beim Verlegen der Bewehrung, beim Betonieren und bei der anschließenden

Nachbehandlung des Betons. Liegt die Nutzung eines Bauwerkes nicht innerhalb des der Planung zugrunde gelegten Rahmens, können auch statische und dynamische Überbelastungen die Konstruktion tiefgreifend schädigen.

Zu den i.a. unbeeinflussbaren Randbedingungen, unter denen ein Bauwerk seinen Verwendungszweck zu erfüllen hat, gehören die Atmosphärien, deren Aggressivität durch die erhebliche Konzentration von Gasen wie Kohlendioxid, Schwefeldioxid und Stickoxiden bestimmt wird. Ist dann ein Bauwerk weder durch einwandfreie Gestaltung und Ausführung noch durch Zusatzmaßnahmen wie z.B. eine Oberflächenbehandlung gegen diese Atmosphärien geschützt, können sie durch Korrosion der Bewehrung und Absprengung von Beton als Begleiterscheinung der dann möglichen chemischen Prozesse so schwerwiegende Folgeschäden hervorrufen, daß ebenfalls die Tragfähigkeit und damit die Standsicherheit gefährdet werden.

Leicht zu erkennende Anzeichen für Schäden der vorgenannten Art sind zunächst spezifische Rißbilder sowie eine unregelmäßige Grautönung größerer, ungegliederter Betonflächen - insbesondere nach Durchfeuchtung infolge Regen. Unter Umständen zeichnen sich dabei sogar die einzelnen Stäbe der Bewehrung ab. Wird keine vorbeugende Sanierung durchgeführt, entstehen dann Rostspuren an den Stellen, die eine besonders geringe Betonüberdeckung der Bewehrung aufweisen. Da die Korrosionsprodukte ein größeres Volumen einnehmen als die ursprünglich metallischen Bewehrungsstäbe, treten schließlich Abplatzungen des Betons auf, so daß die Bewehrung völlig freiliegt. Im allgemeinen ist spätestens zu diesem Zeitpunkt ein Tragfähigkeitsverlust rechnerisch nachweisbar.

1.2 Anwendungsgebiete und prinzipieller Aufbau von Beton- sanierungssystemen

Die Sanierung von Bauwerksmängeln, die durch die im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Schadensursachen entstehen können, ist normalerweise unter einer oder mehreren der folgenden Rubriken einzuordnen:

- Vorbeugen gegen Einwirkung - ggf. aggressiver -
Atmosphärien;
- Herstellen des ursprünglichen bzw. des geplanten
Erscheinungsbildes und/oder bauphysikalischen Verhaltens
hinsichtlich des Feuchtigkeitshaushaltes;
- Herstellen der ursprünglichen bzw. der geplanten
Tragfähigkeit.

Voraussetzung für eine dauerhafte Sanierung ist dabei neben der Eignung der verwendeten Betonsanierungsmaterialien immer die möglichst vollständige Entfernung der geschädigten Bauteilbereiche (z.B. auch chloridverseuchte Betonzone) zuzüglich eines Sicherheitszuschlages von 1-2 cm in der Tiefe und die Herstellung eines sauberen (d.h. frei von Staub, Öl und anderen, trennend wirkenden Substanzen), tragfähigen Untergrundes sowie die ordnungsgemäße Verarbeitung der Betonsanierungsmaterialien.

Entsprechend den unterschiedlichen Anwendungsgebieten, die nicht selten alle zugleich abgedeckt werden müssen , bestehen die heute auf dem Markt befindlichen Sanierungssysteme i.a. aus verschiedenen Materialien (s. Anlage 1.2.1; auf Zusatzmaßnahmen wie kathodischen Korrosionsschutz sei hier nur ergänzend hingewiesen.). Der Reparaturmörtel hat zunächst größere Hohlräume auszufüllen, gegebenenfalls auch die Übertragung von Spannungen aus Eigengewicht, Verkehrslasten und anderen Lastfällen zu

übernehmen. Er besteht aus einem grobkörnigen Zuschlaggemisch mit Kunstharz, Zement oder kunststoffmodifiziertem Zement als Bindemittel bzw. Matrix und kann großflächig u.U. als Spritzbeton aufgebracht werden. Der Egalisierspachtel hat gegenüber dem Reparaturmörtel einen feineren Zuschlag und soll die Unebenheiten an kleineren Ausbrüchen sowie der Reparaturmörteloberfläche ausgleichen.

Die Oberflächenbehandlung in Form einer Endbeschichtung soll gewährleisten, daß sanierte Bereiche in der Bausubstanz optisch unauffällig sind. Zusätzlich kann sie bei entsprechender Konzeption den Feuchtigkeitshaushalt günstig beeinflussen und feine Risse überbrücken, die z.B. in der Zugzone von Stahlbetonbauteilen häufig auftreten. Sofern nicht bereits der die Bewehrung überdeckende Beton bzw. Reparaturmörtel in ausreichendem Maße vor Korrosion schützt, muß die Endbeschichtung auch die korrosiven Medien abhalten können.

Die Bewehrungsbeschichtung soll primär einen Korrosionsschutz bieten. Um eine einwandfreie Haftung des Reparaturmörtels auf der Beschichtung zu erzielen, sind u.U. Zusatzmaßnahmen (z.B. Abstreuen mit feinem Quarzsand) erforderlich. Zur Haftungsverbesserung zwischen Reparaturmörtel und Altbeton kann eine Haftbrücke dienen.

Als Formen der Oberflächenbehandlung sind neben Beschichtungen noch Imprägnierungen und Versiegelungen zu nennen. Wenn jedoch im Rahmen einer Sanierung - wie im Fassadenbereich allgemein üblich - auch ein zufriedenstellendes Erscheinungsbild hergestellt werden soll, ist eine Imprägnierung bzw. Versiegelung zusätzlich mit einer geeigneten Endbeschichtung zu versehen. Unter diesem Gesichtspunkt wird im folgenden als Oberflächenbehandlung nur die Beschichtung behandelt.

2. Chemische und elektrochemische Reaktionen

Die hier zusammengestellten Reaktionen laufen - abgesehen vom Abbindevorgang des Zementes - vornehmlich unter direktem Witterungseinfluß im schadhaften Stahlbeton ab, der infolge ungeeigneter Zusammensetzung, schlechter Verdichtung und/oder infolge Rißbildung einem Eindringen der Atmosphärien nur geringen Widerstand bieten kann. Selbstverständlich sind noch zahlreiche Untersuchungen erforderlich, um über die Relevanz der verschiedenen Vorgänge in der Praxis entscheiden zu können.

Da der Diffusionswiderstand von Beton gegen Schadgase relativ klein ist und zudem die Bewehrung aus statischen Gründen meist möglichst dicht an der Oberfläche der Bauteile angeordnet wird, muß der Korrosionsschutz bei unbeschichtetem Beton in erster Linie auf chemischem Wege erfolgen. Dies ist i.a. (Ausnahmen z.B. im Abschnitt 2.4) möglich, solange der Beton - d.h. der Zementstein - im Bereich der Bewehrung ein alkalisches Milieu gewährleistet und damit die Stahloberfläche passiviert. Chemische Reaktionen des Zuschlages werden hier nicht betrachtet.

2.1 Korrosion des Bewehrungsstahls

Über die Korrosion von Stahl, auch Bewehrungsstahl, liegen zahlreiche Veröffentlichungen vor. Aus diesen Veröffentlichungen (s. z.B. /2.1.1/) geht hervor, daß eine Korrosion von Stahl nur unter folgenden Voraussetzungen auftritt:

- 1) Das elementare Eisen muß in Ionen überführt werden, was ausschließlich in der Anwesenheit von Wasser erfolgt.
- 2) Eine Elektronenabgabe des Eisenelementes muß erfolgen (Oxidation). Diese Oxidation kann durch Sauerstoff oder durch Säuren erfolgen. So kann grob zwischen der sogenannten Sauerstoffkorrosion und der Säurekorrosion unterschieden

werden. Die Säurekorrosion tritt im wesentlichen bis zu einem pH-Wert von höchstens 5 und die Sauerstoffkorrosion im wesentlichen bis zu einem pH-Wert von höchstens 9 auf (s. /2.1.1/). Liegen Anode - Reaktion nach 1) - und Kathode - Reaktion nach 2) - jedoch nicht an einem Bewehrungsstab, ist i.a. der Innenwiderstand des "Elementes" so hoch, daß keine nennenswerte Korrosion auftritt.

- 3) Als korrosionsauslösende Substanzen haben sich des weiteren Chloride, Nitrate und Sulfate erwiesen (s. /2.1.2/). Diese Salze können selbst in geringen Konzentrationen (z.B. 500mg Chloride bzw. 20 g Nitrate in 1 Liter Porenwasser gelöst) in alkalischem Milieu Korrosion verursachen. Wenn man die o.g. Faktoren berücksichtigt, so ergibt sich daraus, daß zur Unterbindung von Korrosion die Anwesenheit von Wasser, Sauerstoff und korrosionsfördernden Salzen am Bewehrungsstahl vermieden werden müßte. Zusätzlich sollte ein möglichst hoher pH-Wert (pH-Wert 12 bis 13) erzielt werden. Eine Absenkung des pH-Wertes auf pH = 11 bei gleichzeitiger Anwesenheit von Chloriden bzw. Sulfaten in einer Konzentration von ca. 100 bzw. 30 mg/l hätte eine deutliche Korrosion des Bewehrungsstahls zur Folge (s. /2.1.3/ bzw./2.1.4/).

2.2 Chemische Reaktion des Zementleims bzw. des Zementsteins beim Anmachen und Erhärten des Betons

Die handelsüblichen Portlandzemente bestehen zu 75 % aus den Mineralien Tricalciumsilicat (C_3S) und Dicalciumsilicat (C_2S). Wird nun die Zusammensetzung der Zemente als Oxide angegeben, so kann von etwa folgenden Werten ausgegangen werden : 64 % CaO , 20 % SiO_2 , 6 % Al_2O_3 , 3 % Fe_2O_3 sowie Anteile von Gips, Alkalioxiden und sonstigen Mineralien. In Tabelle 2.2.1 sind auszugsweise Analysedaten verschiedener handelsüblicher Zemente zusammengestellt.

Bei der Zugabe von Wasser zu diesen Zementen entstehen neben Calciumsilicathydraten Calciumhydroxid und die verschiedenen Hydroxide der im Zement vorhandenen Oxide (Tabelle 2.2.1). Durch die Bildung des Zementsteins entstehen Poren, in denen sich die sogenannte Porenflüssigkeit ansammelt, welche im wesentlichen die Hydroxide in gelöster Form enthält. Diese Lösungen reagieren stark alkalisch (pH-Wert bis ca. 13,5).

Die vorgenannten Hydroxide haben eine passivierende Wirkung auf Stahl. D.h. der im Beton eingebettete Stahl wird durch die alkalische Reaktion der Porenflüssigkeit des Zementsteins geschützt. Diese Alkalität wird spätestens nach 7 Tagen im wesentlichen nur noch von den Alkalihydroxidlösungen bzw. von der Löslichkeit des Calciumhydroxids in Alkalihydroxidlösungen bestimmt (s. /2.2.1/).

2.3 Mögliche chemische Reaktionen von Atmosphärlinien mit zementgebundenen Baustoffen

Der Zementstein kann in Verbindung mit Wasser und Sauerstoff mit verschiedenen Atmosphärlinien wie Kohlendioxid, Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid und Schwefeldioxid chemisch reagieren. In den folgenden Abschnitten werden einzelne solcher Reaktionsmechanismen näher besprochen und in Abschnitt 2.4 dann hinsichtlich ihres Einflusses auf die Korrosionsschutzwirkung des Zementsteins für den Betonstahl betrachtet. In Abschnitt 7 wird ebenfalls die Wirkungsweise der Atmosphärlinien mit dem Zementstein berücksichtigt.

2.3.1 Chemische Reaktion des Zementsteins mit Kohlendioxid (CO_2)

Hierbei ablaufende Reaktionen und ihre Reaktionsprodukte sind in Tabelle 2.3.1.1 zusammengestellt. Der dort in Zeile 1 dargestellte Prozeß wird üblicherweise als Carbonatisierung bezeichnet. Wenn man die Löslichkeit der Reaktionsprodukte aus den Hydroxiden mit Kohlendioxid betrachtet, ergibt sich, daß die Erdalkalicarbonate wie Calciumcarbonat und Magnesiumcarbonat praktisch unlöslich sind, während das Natriumcarbonat mäßig löslich und das Kaliumcarbonat leichtlöslich sind. Das bedeutet, daß in der Porenflüssigkeit nach Reaktion mit Kohlendioxid im wesentlichen Kaliumcarbonat und Natriumcarbonat enthalten sind. Betrachtet man nun die pH-Werte der in Tabelle 2.3.1.1 aufgeführten Lösungen von Hydroxiden und Carbonaten, so ergibt sich für Kaliumcarbonat und Natriumcarbonat in einer 1%-igen Lösung ein pH-Wert von ca. 11,5. Bei der Reaktion von Kohlendioxid mit den Porenflüssigkeiten bleibt also auch nach vollständiger chemischer Reaktion des Kohlendioxides mit den Hydroxiden die alkalische Wirkung (durch Kaliumcarbonat und Natriumcarbonat) erhalten. Wird nun Wasser in erhöhtem Maße, z.B. durch dauernde Durchfeuchtung des Betons, an die Porenlösung herangebracht, so werden zunächst die Alkalicarbonate ausgewaschen. Anschließend kann bei einem Kohlendioxidüberschuß in Regenwasser das Calciumcarbonat in leichtlösliches Calciumbicarbonat umgesetzt werden.

2.3.2 Chemische Reaktionen des Zementsteins mit Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO , NO_2) in Verbindung mit Sauerstoff (O_2)

Die möglichen chemischen Reaktionen der Schadgase wie SO_2 , NO und NO_2 mit dem Zementstein sind in Tabelle 2.3.2.1 zusammengestellt. Dabei ist zu beachten, daß in der Luft genügend oxidationsfähiger Sauerstoff enthalten ist, der im besonderen die Stickoxide in

wäßriger Phase in Nitrat-Ionen umwandeln kann. Wie aus der Tabelle 2.3.2.1 zu ersehen ist, ist das Calciumsulfat praktisch unlöslich, während das Calciumnitrat wie die anderen Nitrate leichtlöslich ist. Aus diesen Überlegungen kann abgeleitet werden, daß die Reaktion von Beton mit Schwefeldioxid in Verbindung mit Sauerstoff weniger kritisch ist als die Reaktion mit Stickoxiden. Die von Fachleuten beobachtete porenverstopfende Wirkung bei der Reaktion von Schwefeldioxid mit Beton läßt sich mit dem Ausfällen von unlöslichem Calciumsulfat erklären.

Aus dem Vorgenannten geht damit hervor, daß hauptsächlich die Stickoxide in Verbindung mit Sauerstoff und Wasser eine zementsteinzerstörende Wirkung ausüben können.

2.4 Korrosionsschutzwirkung des Zementsteins durch Reaktion mit Atmosphärlinien

Wie aus den vorgenannten Abschnitten u.a. hervorgeht, kann Zementstein aufgrund seiner Zusammensetzung sowohl ohne Reaktion als auch nach Reaktion mit Kohlendioxid einen wirksamen Schutz gegen die Korrosion der Bewehrung darstellen, sofern die Porenflüssigkeiten durch Lösung der dabei gebildeten Alkalihydroxide und -carbonate einen pH-Wert von über 11 aufweisen. Selbst ein carbonatisierter Zementstein bietet somit einen gewissen Korrosionsschutz. Beim Zutritt von Stickoxiden (NO , NO_2) und Schwefeldioxid (SO_2) in Verbindung mit Sauerstoff entstehen jedoch korrosionsfördernde Nitrate bzw. Sulfate. Insbesondere die Alkalinitrate können eine Stahlkorrosion hervorrufen, auch wenn die Porenflüssigkeiten infolge Lösung von Alkalicarbonaten und -hydroxiden alkalisch reagieren. Aufgrund der vorgenannten möglichen chemischen Reaktionen und der in Versuchen nachgewiesenen Erscheinungen kann

gesagt werden, daß das größte Problem in bezug auf die Zerstörung des Zementsteins die Einwirkung von Stickoxiden in Verbindung mit Sauerstoff und Wasser darstellt. Wie schnell allerdings die einzelnen Reaktionen ablaufen, ist nicht nur, wie in /2.4.1/ beschrieben, von den verschiedenen Konzentrationen der Gase und Salze, sondern auch in erheblichem Maße von der Betonqualität abhängig. Einen weiteren wesentlichen Faktor stellt die Diffusionsgeschwindigkeit der Gase in den Zementstein bzw. durch den Zementstein dar. Dabei müssen natürlich auch die chemischen Reaktionen der Gase mit dem Zementstein berücksichtigt werden. So ist zu beachten, daß nicht nur Kohlendioxid und Schwefeldioxid in gewissem Umfang porenverstopfende Vorgänge auslösen, sondern gleichzeitig auch die im Beton vorhandenen Mineralien und Salze infolge ihres Reaktionsvermögens eine gewisse Puffereigenschaft besitzen.

Auch bei diesen Überlegungen ergibt sich, daß sich neben Schwefeldioxid die Stickoxide in Verbindung mit Sauerstoff und Wasser am ungünstigsten auf die Schutzwirkung des Zementsteins hinsichtlich des Bewehrungsstahls auswirken. Allerdings wird das Schwefeldioxid normalerweise bereits in den Zonen dicht unter der Betonoberfläche in praktisch wasserunlösliches Calciumsulfat überführt und dringt damit selbst in porösem Beton nur schwer bis zur Bewehrung vor.

3. Anforderungsprofil für ein Betonsanierungssystem

In Abschnitt 1.2 wurden die Aufgaben der einzelnen Materialien eines Betonsanierungssystems beschrieben, in Abschnitt 2 die wesentlichen chemischen Reaktionen im Zementstein im Hinblick auf die Korrosion der Bewehrung im Beton. Zusammen mit Überlegungen zum Spannungszustand in sanierten Bauteilen kann damit ein Anforderungsprofil für die einzelnen Betonsanierungsmaterialien erstellt werden. Entsprechend der Themenstellung liegt dabei der Schwerpunkt auf der Oberflächenbehandlung.

3.1 Anforderungsprofil für die Betonsanierungsmaterialien (ausgenommen Endbeschichtung - s. Abschnitt 3.2)

3.1.1 Eigenschaften

Grundsätzlich ist von allen Materialien eine gleichmäßige Lieferqualität zu fordern.

Zwischen Reparaturmörtel und Beton muß ein ausreichender Verbund bestehen. Um die Spannungen in der Kontaktfuge möglichst gering zu halten, sollten die thermischen Ausdehnungskoeffizienten der beiden Materialien in derselben Größenordnung liegen. Da der Schwindvorgang im Beton zum Zeitpunkt der Sanierung i.a. weitgehend abgeklungen ist, sollte das Schwindmaß des Reparaturmörtels - ebenso wie das Quellmaß - möglichst klein sein. Um im Brandfall die Bewehrung vor zu starker Erwärmung schützen zu können, dürfen Feuerwiderstand und Wärmedämmung des Reparaturmörtels bestimmte Werte nicht unterschreiten.

Wird vom Reparaturmörtel eine Spannungsaufnahme im Rahmen der rechnerischen Lastabtragung erwartet, muß sein Spannungs-Dehnungs-Verhalten sowie seine Festigkeit auf den Beton abgestimmt sein und ein guter Haftverbund zur Bewehrung bestehen. Anderenfalls gestaltet sich die Querschnittsbemessung sehr kompliziert, da dann u.U. ein Ebenbleiben des Querschnitts nicht mehr angenommen werden kann. Zudem ist zu beachten, daß im Regelfall zum Zeitpunkt der Sanierung der Beton unter Spannung steht, während der Reparaturmörtel praktisch spannungsfrei ist.

An den Egalisierspachtel sind zunächst - abgesehen vom Verbund mit der Bewehrung - dieselben Anforderungen zu stellen wie an den Reparaturmörtel, da die Egalisierspachtelschichten normalerweise ebenfalls innerhalb des Bemessungsquerschnitts für die Lastabtragung liegen. Die Schichten sind aber relativ dünn, und

der Elastizitätsmodul ist aufgrund des feineren Korngerüsts meist deutlich niedriger. Damit reduzieren sich die Anforderungen im wesentlichen auf einen guten Haftverbund zum Untergrund (Beton oder Reparaturmörtel) sowie auf eine sinnvolle Abstimmung zwischen Schwind- und Quellmaß, Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul einerseits und den in der Kontaktfuge zum Untergrund übertragbaren Spannungen andererseits. Risse dürfen - unabhängig von der örtlichen Schichtdicke - nicht infolge Eigenspannungen im Egalisierspachtel auftreten, sondern höchstens in dem Maße, wie sie auch im darunterliegenden Beton nach der Applikation zu erwarten sind.

Dient die Bewehrungsbeschichtung in erster Linie als Korrosionsschutz, ist auf eine porenfreie Beschichtung zu achten, da kleine, ungeschützte Stellen in Verbindung mit den i.a. ebenfalls ungeschützten Bewehrungsstabbereichen außerhalb der Sanierungszone zu Anoden von Lokalelementen werden können. Wegen der dann sehr großen Kathodenfläche kommt es im Bereich der Fehlstelle zu verstärkter Korrosion (s. /3.1.1.1/). Ist rechnerisch eine Lastabtragung vorgesehen, muß der Haftverbund des beschichteten Stabes im Reparaturmörtel die Übertragung der dabei auftretenden Verbundspannungen aufnehmen können.

Der Haftanstrich muß eine einwandfreie Verbindung zwischen Beton und Reparaturmörtel bzw. Egalisierspachtel herstellen. Es ist aber bei großflächigen Sanierungen darauf zu achten, daß der Haftanstrich nicht zu einer ungewollten Diffusionsbremse wird.

3.1.2 Randbedingungen

Die hier aufgelisteten Anforderungen müssen von den einzelnen Betonsanierungsmaterialien unter den im Praxisfall auftretenden Randbedingungen erfüllt werden. Insbesondere sind hierbei hohe sowie stark veränderliche Temperaturen und Feuchtigkeiten (auch des Untergrundes!) zu berücksichtigen, die eine schnelle Alterung sowie Quell- und Schwindvorgänge hervorrufen können. Außerdem

können - zumindest in Bauzuständen ohne Endbeschichtung - aggressive Medien von außen einwirken. Um die im Labor festgestellten Eigenschaften auch in der Praxis zuverlässig zu erreichen, müssen die Materialien in einem gewissen Rahmen lagerfähig sein. Die Verarbeitungsbedingungen sollten einen ausreichenden Spielraum lassen für Verarbeitungstemperaturen sowie Arbeitsunterbrechungen während eines Arbeitsganges oder zumindest zwischen verschiedenen Arbeitsgängen. Soweit einzelne Betonsanierungsmaterialien erst auf der Baustelle aus mehreren Komponenten zu mischen sind, kann zur Vermeidung von Mischungsfehlern die Größe der einzelnen Gebinde auf das vorgeschriebene Mischungsverhältnis abgestimmt werden. Eine unterschiedliche Färbung der einzelnen Komponenten läßt dann leicht den erreichten Grad der Durchmischung erkennen. Die Konsistenz der Betonsanierungsmaterialien sollte dem Wunsch nach einer zügigen Verarbeitung entgegenkommen.

3.2 Anforderungsprofil für Endbeschichtungen

3.2.1 Eigenschaften

Nach Applikation der Endbeschichtung dürfen sich sanierte Bereiche weder im Farbton noch in der Oberflächenstrukturierung von den übrigen - im Regelfall ebenfalls mit der Endbeschichtung versehenen - Flächen abheben. Es dürfen keine auffälligen Veränderungen auftreten wie deutliche lokale oder allgemeine Farbtonänderungen bzw. Verschmutzungen, Blasen, Risse oder Runzeln.

Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit der Beschichtung sind Abwitterungen nur in begrenztem Umfang zulässig. Die Haftung muß in der Größenordnung der Abreißfestigkeit des Untergrundes liegen.

Wie in Abschnitt 2 dargestellt, spielt bei den hier betrachteten chemischen Prozessen das Wasser eine wesentliche Rolle. Durch eine Austrocknung des Betons kann daher die Korrosionsgeschwindigkeit der Bewehrung vermindert werden. Auch im Hinblick auf die Frostbeständigkeit des Betons und die Vermeidung von Schäden durch Treiben alkaliempfindlicher Zuschläge ist ein ausreichend trockener Beton anzustreben. Um eine Austrocknung zu erleichtern, sollte der Dampfdiffusionswiderstand der Beschichtung klein sein. Gleichzeitig sollte möglichst wenig neue Feuchtigkeit von außen - z.B. bei Schlagregen - eindringen. Diese beiden gegensätzlichen Forderungen sind so aufeinander abzustimmen, daß auf Dauer die Ausgleichsfeuchte einen vertretbaren Grenzwert nicht überschreitet und dennoch ein hoher Diffusionswiderstand gegenüber den Gasen O_2 , CO_2 , SO_2 und NO_x erreicht wird. Außerdem sollte im Hinblick auf die Anwendung im Sockelbereich und bei nichtbefahrenen Verkehrsflächen eine Sperrwirkung gegen Chloride (Tausalz) gewährleistet werden.

Bei Diffusionsvorgängen ist die Massenstromdichte (z.B. in $g/(m^2 \times h)$) relativ klein. Treten nun in Beschichtungsfilm an Fehlstellen - z.B. kapillare - Transportvorgänge relativ großer Massenstromdichte auf, kann die mittlere Massenstromdichte in einem von Fehlstellen durchsetzten Bereich so stark zunehmen, daß die Diffusionseigenschaften eines Beschichtungsfilmes nur noch eine untergeordnete Rolle spielen (s. /3.2.1.1/). Bei der Applikation entstandene kleine Fehlstellen (z.B. eingeschlossene Luftblasen) werden bei der Messung des Diffusionswiderstandes miterfaßt. Entstehen dagegen nach der Applikation infolge Rißöffnung bzw. -erweiterung im Untergrund oder Eigenspannungen auch im Beschichtungsfilm Risse, kann ihr Einfluß auf die zu regulierenden Transportvorgänge kaum abgeschätzt werden. Daher ist zu fordern, daß ein Beschichtungsfilm Risse, die im Untergrund nach der Applikation aufgehen, bis zu einer praxisnahen Breite überbrückt,

ohne selbst zu reißen. Da die Risse am Bauwerk häufig bei Frostaufgang entstehen, ist das entsprechende Verhalten des Beschichtungsfilms auch bei niedrigen Temperaturen (z.B. 0°) zu untersuchen, da u.U. bei der dann meist verminderten Reißdehnung die Reißüberbrückung problematisch werden kann.

3.2.2. Randbedingungen

Zunächst gilt für die Randbedingungen, unter denen ein Beschichtungsfilm die obengenannten Anforderungen zu erfüllen hat, das in Abschnitt 3.1.2 für die übrigen Betonsanierungsmaterialien gesagte. Als wesentlicher Faktor kommt jedoch die direkte Bewitterung mit UV-Strahlung und Beregnung hinzu.

4. Bewertungskriterien

Die in Abschnitt 3.2.1 für eine Endbeschichtung geforderten Eigenschaften führen zu folgenden Merkmalen:

- Farbechtheit;
- Verschmutzungs- und Bewuchsneigung (Algen, Moose u.a.);
- augenscheinliche Veränderungen der Struktur, die auf eine verminderte Funktionsfähigkeit der Endbeschichtung hinweisen (Blasen, Runzeln o.ä.);
- Abwitterung;
- Haftung auf dem Untergrund;
- bauphysikalisches Verhalten hinsichtlich Feuchtigkeitshaushalt;
- Durchlässigkeit gegenüber Gasen;
- Durchlässigkeit gegenüber Chloriden;
- Dehnfähigkeit im Reißbereich;
- Lieferqualität;
- Lagerfähigkeit.

Die zugehörigen Bewertungsverfahren sowie die Bestimmung nicht durch Augenschein erkennbarer Bewertungskriterien werden in den Abschnitten 4.1 bis 4.12 angegeben. Soweit nichts anderes angegeben, werden die Untersuchungen im Rahmen der Bewertungsverfahren bei Normalklima durchgeführt. Die Anforderungen an die Bewertungskriterien sind in den Anlagen 5.2 bis 5.4 zusammengestellt.

4.1 Farbechtheit

Die Farbechtheit (Lichtechtheitstyp; s. DIN 54 004) wird durch den Vergleich der Farbänderungen eines Prüfkörpers mit denen der einzelnen Felder eines in DIN 54 004 festgelegten achteiligen Lichtechtheitsmaßstabes bestimmt.

4.2 Verschmutzungsanfälligkeit, Neigung zu Bewuchs

Einen Hinweis auf die Verschmutzungsanfälligkeit stellen Anzeichen für Thermoplastizität dar, die unter den Randbedingungen für die Bewertung nach Abschnitt 4.1 an einem freien Film sichtbar werden, der auf einem feinmaschigen Drahtnetz (ca. 3 mm Maschenweite) aufliegt. Außerdem kann die Verschmutzungsanfälligkeit zusammen mit der Neigung zu Bewuchs an freibewitterten Prüfkörpern für die Bewertung nach Abschnitt 4.5 (Haftung auf dem Untergrund) beurteilt werden.

4.3 Augenscheinliche Veränderungen der Struktur

Eine augenscheinliche Veränderung, die auf eine verminderte Funktionsfähigkeit der Endbeschichtung hinweist, kann zunächst z.B. durch die Angabe des Blasengrades nach DIN 53 209 beschrieben werden. Andere Veränderungen sind Runzeln, Risse (s. z.B. DIN ISO

4628 Teil 4) Ablösungen (s. z.B. DIN ISO 4628 Teil 5) am Prüfkörperperrand. Ferner ist eine Änderung im Glanz sowie ggf. die Art der Abwitterung (z.B. Kreiden, Ablösen von Schuppen) anzugeben.

4.4 Abwitterungen

Die Abwitterung ist durch die prozentuale Abnahme der Schichtdicke z.B. infolge Kreidens oder ähnlicher Erscheinungen zu beschreiben. Das Kreidungsverhalten kann über die Schichtdickenabnahme bestimmt werden.

4.5 Haftung auf dem Untergrund

Die Haftung auf Beton, Egalisierspachtel oder anderen vorausgehenden Schichten wird durch Abreißversuche nach DIN ISO 4624 mit Abreißkörpern (Durchmesser 40 mm) bestimmt. Beim Vergleich mit an Abreißkörpern anderer Durchmesser ermittelten Abreißfestigkeiten muß vorausgesetzt werden, daß wenigstens der Parameter "sigma Punkt = Spannungssteigerungsrate im Prüfquerschnitt pro Zeiteinheit" denselben Wert hat.

4.6 Bauphysikalisches Verhalten hinsichtlich des Feuchtigkeitshaushaltes

Bei beschichtetem Beton wird der Feuchtigkeitshaushalt im wesentlichen durch die Vorgänge "kapillare Wasseraufnahme" - z.B. bei Schlagregen - und "Wasserdampfabgabe durch Diffusion" - insbesondere bei starker Erwärmung - geregelt. Die diese Vorgänge charakterisierenden Kennwerte sind der Wasseraufnahmekoeffizient

und die Wasserdampfdurchlässigkeit. Inwieweit die beiden Vorgänge günstig zusammenwirken, kann in Anlehnung an DIN 18 558, Ziffer 6.2.4 abgeschätzt werden.

Die beiden folgenden Abschnitte enthalten Angaben zur Bestimmung der charakteristischen Kennwerte.

4.6.1 Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahme wird durch den nach DIN 52 617 E bestimmten Wasseraufnahmekoeffizienten beschrieben. Dazu werden die an den Seitenflächen versiegelten Prüfkörper ca. 1 cm tief mit der beschichteten Fläche nach unten in Wasser eingetaucht und die Gewichtszunahme über die Zeit ausgewertet. Die Beschichtung wird dazu in praxisüblicher Dicke aufgetragen.

4.6.2 Wasserdampfdiffusion

Die Wasserdampfdiffusion wird nach DIN 52 615 Teil 1 im Trocken- und im Feuchtbereichverfahren am freien Film gemessen. Dazu wird ein Schälchen - gefüllt mit einem geeigneten Sorbens - mit einem Beschichtungsfilm in praxisüblicher Dicke dicht abgeschlossen und in einem Exsikkator gelagert. Damit kann ein definiertes Feuchtigkeitsgefälle am Beschichtungsfilm hergestellt werden. Die Diffusion wird gravimetrisch bestimmt. Der charakteristische Kennwert ist die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke.

Diese Methode hat gegenüber der Messung der Dampfdiffusion an einer Beschichtung auf Träger (Betonscheibe) den Nachteil, daß der Diffusionsvorgang am Bauwerk nur grob simuliert wird (s. /4.6.2.1/). Durch Ausschluß des Parameters "Betonscheibe" wird aber die Vergleichbarkeit von Meßreihen an unterschiedlichen Filmen mit sonst gleichartigen Randbedingungen verbessert.

Im Hinblick auf den Feuchtigkeitshaushalt ist die im Feuchtbereich gegebene diffusionsäquivalente Luftschichtdicke entscheidend. Die im Trockenbereich durchgeführte Messung liefert einen Anhalt dafür, wie stark der Wert sich in Abhängigkeit von der jeweiligen Feuchtigkeitssituation ändern kann.

4.7 Durchlässigkeit gegenüber Gasen

Wie bei Wasserdampf ist auch bei Gasen wie Kohlendioxid und Sauerstoff das Durchdringen des Beschichtungsfilmes als Diffusionsvorgang zu betrachten. Der charakteristische Kennwert ist damit ebenfalls die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke, deren Berechnung aus dem gemessenen Diffusionsstrom in DIN 52 615 Teil 1 angegeben ist.

Für dieses Forschungsvorhaben wurde nur die Diffusion von Kohlendioxid und Sauerstoff untersucht. Die nach Abschnitt 2 als ebenfalls relevant zu betrachtenden Stickoxide und u.U. auch Schwefeldioxid erfordern einen zusätzlichen Geräteaufwand, der den Rahmen des Forschungsvorhabens gesprengt hätte. Bei der Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg laufen zur Zeit Untersuchungen, um ein geeignetes Diffusionsmeßverfahren zu entwickeln, das sowohl im Trockenbereich wie im Feuchtbereich (d.h. unter praxisnahen Randbedingungen) für Gase und Gasgemische universell geeignet ist.

4.7.1 Diffusion von Kohlendioxid

Bei den Messungen der Kohlendioxiddiffusion wird der mögliche Einfluß einer gleichzeitigen Wasserdampfdiffusion berücksichtigt. Da das zur Absorption von Kohlendioxid verwendete Natriumhydroxid auf Träger auch Wasser absorbiert, kann die relativ einfache Meßanordnung zur Untersuchung der Kohlendioxiddiffusion ohne gleichzeitige Wasserdampfdiffusion nicht für die Untersuchungen mit gleichzeitiger Wasserdampfdiffusion eingesetzt werden. Daher wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens die in Abschnitt 4.7.1.2 beschriebene Meßmethode entwickelt.

Beiden hier beschriebenen Verfahren liegt die gravimetrische Bestimmung der diffundierten Kohlendioxidmenge zugrunde. Da hierbei z.T. Gewichtsveränderungen bis herab zu 0.1 mg erfaßt werden müssen, könnten bei Meßbeginn noch in der Prüfanordnung (Schälchen mit freiem Film und Sorbens, s. Abschnitt 4.7.1.1, bzw. Diffusionskammer mit freiem Film, s. Abschnitt 4.7.1.2) vorhandene flüchtige Anteile die Meßergebnisse dahingehend verfälschen, daß sich ein zu hoher Diffusionswiderstand ergibt. Aus diesem Grund sind z.B. ca. 0.2 mm dicke Filme auf Dispersionsbasis bis zu 6 Wochen bei Raumklima zu trocknen, bevor Gewichtskonstanz erreicht ist. Bei einer beschleunigten Trocknung mit Temperaturen bis höchstens 40° C ist zu bedenken, inwieweit dies mit den am Bauwerk vorhandenen Bedingungen vereinbar ist.

4.7.1.1 Diffusion von Kohlendioxid ohne gleichzeitige Wasserdampfdiffusion

Die Messungen werden sinngemäß nach DIN 53 122 Teil 1 an freien Filmen in praxisüblicher Dicke durchgeführt. Einzelheiten zur Meßapparatur enthält Anlage 4.7.1.1.1. Das Kohlendioxidangebot des Prüfgasdurchsatzes sollte etwa um den Faktor 100 über der Kohlendioxidabsorption der Prüfanordnung liegen. Die diffundierte CO₂-Menge wird durch Wägen der Schälchen (s. Abschnitt 4.6.2) bestimmt.

4.7.1.2 Diffusion von Kohlendioxid bei gleichzeitiger Wasserdampfdiffusion

Das Prinzip der Meßapparatur ist in Anlage 4.7.1.2.1 dargestellt. Als Träger für den in praxisüblicher Dicke hergestellten Beschichtungsfilm wird Papier (ca. 80 g/m²) verwendet. Bei Versuchen mit Träger "Beton" lassen die dabei gemessenen kleinen CO₂-Diffusionsraten darauf schließen, daß möglicherweise auch Reaktionen zwischen CO₂ und Beton stattgefunden haben. Die

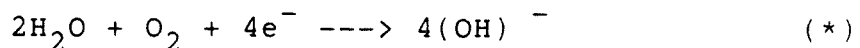
entsprechenden Ergebnisse werden nicht verwertet. Die relative Feuchtigkeit des Prüfgases liegt bei der angegebenen Anordnung bei ca.70%.

Vor Untersuchungsbeginn ist in speziellen Meßanordnungen festzustellen, daß an den Zuleitungen zwischen den Einzelapparaturen nur eine vernachlässigbare Wasserdampf- und CO₂-Diffusion auftritt. Außerdem ist zu überprüfen, daß der Rand des Beschichtungsfilmes diffusionsdicht an die Wandung der Diffusionskammer angeschlossen ist und daß die Gase während einer Meßperiode nach Durchströmung einer Absorptionsapparatur (mit einem Sorbens gefülltes U-Rohr entsprechend Anlage 4.7.1.2.1) praktisch keine Bestandteile mehr enthalten, die in dieser Absorptionsapparatur absorbiert werden sollen.

Die diffundierte CO₂-Menge wird durch Wägen der entsprechenden Absorptionsapparatur bestimmt.

4.7.2 Diffusion von Sauerstoff

Unseres Wissens wird das hier beschriebene Meßverfahren im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erstmals im Zusammenhang mit Betonbeschichtungen eingesetzt. Das Prinzip der Meßapparatur ist in Anlage 4.7.2.1 dargestellt. Die theoretischen Grundlagen sind in /4.7.2.1/ beschrieben. An der Anode gehen Fe²⁺ - Ionen in Lösung, während die freien Elektronen zur Kathode wandern und dort vereinfacht dargestellt nach der Gleichung



reagieren. Ein diffundiertes Sauerstoffmolekül reagiert also mit vier Elektronen. Wird der Partialdruck des Sauerstoffes auf der beaufschlagten Seite des Beschichtungsfilmes so klein gewählt, daß sämtliche diffundierten Moleküle sofort reagieren können, kann man

unter Berücksichtigung der Größe der beaufschlagten Fläche aus dem zwischen Anode und Kathode fließenden Strom die Diffusionsstromdichte i bestimmen, wie die folgende Herleitung zeigt.

Die Ladung eines Elektrons e (Elementarladung) entspricht 1.602×10^{-19} C (Coulomb) . Die Einheit der Stromstärke A (Ampere) ist definiert durch $A = C/s$ (Sekunde) bzw. mit der obengenannten Beziehung

$$A = 6.24 \times 10^{18} e /s.$$

Zunächst sei vorausgesetzt, daß das angefeuchtete Papier keinen Diffusionswiderstand darstelle und der Ohmsche Widerstand der Meßapparatur vernachlässigbar groß sei. Mit Gleichung (*) folgt dann, daß einem Strom I_1 von 1 A ein Diffusionsstrom G von $6.24 \times 10^{18}/4 = 1.56 \times 10^{18}$ O_2 -Molekülen pro Sekunde entspricht. 1 Mol Sauerstoff enthält 6.022×10^{23} O_2 -Moleküle (Avogadrosche Zahl) und hat eine Masse von 32 g (Atomgewicht von Sauerstoff ist 16.). Mit diesen Beziehungen ergibt sich für den Diffusionsstrom G bei einem theoretischen Strom I_1 von 1 A

$$\begin{aligned} G &= (1.56 \times 10^{18} / 6.022 \times 10^{23}) \times 32 \text{ g/s} \\ &= 8.29 \times 10^{-5} \text{ g/s} \end{aligned}$$

Führt man nun noch den Querschnitt der in der Meßanordnung permeierten Fläche A_p ein, ergibt sich für die Diffusionsstromdichte i der Wert

$$i \text{ (in g/(cm}^2\text{xs))} = 8.29 \times 10^{-5} \times I \text{ (in A)} / A_p \text{ (in cm}^2 \text{) (**)}$$

mit $I =$ theoretischer Wert der Stromstärke

Der in der Meßanordnung gemessene Meßwert I_{tot} differiert jedoch gegenüber dem in Gleichung (**) einzusetzenden theoretischen Wert I , da die Meßapparatur - wie oben bereits angedeutet - nicht ideal ist. Es fließt nämlich ohne Sauerstoffbeaufschlagung der Strom I_0 (d.h. der Ohmsche Widerstand der Meßapparatur ist nicht vernachlässigbar groß) und mit Sauerstoffbeaufschlagung, jedoch ohne Beschichtungsfilm, der endliche Strom $I_{Papier} < I_{theor.}$ (d.h. das angefeuchtete Papier stellt selbst einen Diffusionswiderstand dar. Hierzu sei angemerkt, daß auch der bei einem gegen Null gehenden Diffusionswiderstand des angefeuchteten Papiers fließende Strom wegen der endlichen Molekülverteilungsdichte und -geschwindigkeiten den oberen Grenzwert $I_{theor.}$ nicht überschreitet. Diese Einflüsse werden aber dadurch eliminiert, daß der gesamte Diffusionsvorgang nicht absolut ausgewertet wird, sondern in Relation gesetzt wird zur Diffusion in Luft (Diffusionswiderstandszahl).).

Aus den Beziehungen in einem verzweigten Stromkreis mit Ohmschen Widerständen (s. Anlage 4.7.2.2) läßt sich folgender Zusammenhang zwischen dem theoretischen Wert I und den Meßwerten I_0 , I_{Papier} und I_{tot} ableiten (Voraussetzung $I_{Papier} \ll I_{theor.}$):

$$1/I = 1/(I_{tot} - I_0) - 1/(I_{Papier} - I_0) \quad (***)$$

Mit diesem aus den Meßwerten abgeleiteten theoretischen Wert I kann dann über Gleichung (**) die Diffusionsstromdichte i berechnet werden. Die anschließende Bestimmung der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke entspricht dem in DIN 52 615 Teil 1 für Wasserdampfdiffusion angegebenen Berechnungsgang.

4.8 Durchlässigkeit gegenüber Chloriden

Das folgende Verfahren wird unseres Wissens hier erstmals beschrieben. Der Chloriddurchgang wird anhand des unterschiedlichen Chloridgehaltes über die Tiefe bei beanspruchten gegenüber unbeanspruchten Prüfkörpern untersucht. Dazu werden bei gleichartigen Betonkörpern alle Flächen bis auf eine versiegelt.

Die unversiegelte Fläche wird dann mit dem zu untersuchenden Beschichtungsfilm versehen. Anschließend wird ein Teil der Betonkörper über 28 Tage einer Salzsprühnebelbeanspruchung nach DIN 50 021 unterworfen. Dabei zeigt jeweils die beschichtete Fläche nach oben und ist zwischen 60° und 75° gegen die Horizontale geneigt.

Nach der Beanspruchung wird an den beanspruchten und gleichzeitig an den unbeanspruchten, aber im übrigen gleichartigen Betonkörpern ein Profil der Chloridkonzentration über die Tiefe bestimmt. Dazu werden unmittelbar nach Abschluß der Salzsprühnebelbeanspruchung in Tiefenrichtung liegende Bohrkerne trocken gezogen und sofort anschließend ebenfalls trocken in Kreisscheiben gesägt. Die Chloridkonzentration in den einzelnen Scheiben wird analytisch bestimmt.

Die Auswertung liefert ein Profil über die trotz Beschichtung auftretende Chloridkonzentrationserhöhung in Abhängigkeit von der Tiefe. Bewertungskriterium ist die Zunahme des Chloridgehaltes infolge Salzsprühnebelbeanspruchung. Bezugsniveau ist der Chloridgehalt des unbeanspruchten Betons, der sich aus dem Chloridgehalt des unbeschichteten Betons sowie ggf. dem Gehalt an eingedrungenen, chloridhaltigen Bestandteilen des Beschichtungsmaterials zusammensetzt. Der entsprechende Wert der Chloridkonzentration wird für zwei Schichten bestimmt, die zwischen 0 und 8 mm sowie zwischen 12 mm und 20 mm unter der beschichteten Fläche liegen.

Zur Information wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens in einem Langzeitversuch der Chloriddurchgang an einem praktisch porenfreien Film (unpigmentiert; Bindemittel: Epoxidharz; Dicke 0.2 mm) untersucht. In der eigens zu diesem Zweck entwickelten Prüfapparatur wurde der obengenannte Film dicht zwischen die Stützen (Innendurchmesser ca. 10 cm; geschliffener Flansch) zweier kugelförmiger Glasbehälter (Volumen jeweils ca. 2 l) eingespannt. Anschließend wurde der eine Glasbehälter mit entsalztem Wasser gefüllt, der andere mit einer Lösung aus 10 MT NaCl in 100 MT Wasser. Die Füllung erfolgte über Einfüllöffnungen

mit Schraubverschluß, die jeweils den obenerwähnten Stützen gegenüberlagen. In bestimmten Zeitabständen wurden an den Einfüllöffnungen kleine Flüssigkeitsmengen entnommen und ihr Chloridgehalt bestimmt. Dabei nahm der Chloridgehalt des entsalzten Wassers innerhalb von 3 1/2 Jahren um 1 ppm (entspricht ca. 1,6 mg NaCl/l) zu.

Eine derartig hohe Schutzwirkung einer Beschichtung gegenüber Tausalzen ist allerdings nur gegeben, wenn die Beschichtung fehlerstellenfrei bzw. porenfrei ist. Für diese Prüfung wird auf die beschichtete Oberfläche einer Betonplatte mit den Abmessungen 400 mm x 400 mm x 50 mm ein mit 1 %-iger Natriumchloridlösung getränkter Wattebausch und darüber eine Kupferplatte mit den Abmessungen 100 mm x 100 mm x 0,5 mm aufgelegt. Danach wird der Durchgangswiderstand zwischen dieser Kupferplatte und der Unterseite der angefeuchteten Betonplatte gemessen. Bei einem Durchgangswiderstand in der Größenordnung von 200 Mega-Ohm kann die Beschichtung als baupraktisch porenfrei bezeichnet werden.

4.9 Dehnfähigkeit im Rißbereich

Die Prüfung wird nach den in /4.9.1/ unter Ziffer 4.1 aufgeführten Randbedingungen durchgeführt. Dazu wird die Biegezugzone von speziellen Betonkörpern mit schalungsglatte sowie mit gestrahlter Oberfläche (siehe /4.9.1/) beschichtet und nach Trocknung des Beschichtungsfilms so weit belastet, bis im Beton Risse mit einer Rißbreite von 0,2 mm entstehen. Abweichend von der genannten Prüfvorschrift /4.9.1/ ist der dann erreichte Verformungszustand über 24 Stunden zu halten. Das Verhalten der Beschichtung im Rißbereich wird beurteilt. In /4.9.2/ wird darauf hingewiesen, daß die Randbedingungen bei dieser Prüfungsmethode im Vergleich zur Situation am Bauwerk i.a. zu günstig sind. Zur Abdeckung dieser Diskrepanz wäre ggf. ein Abminderungsfaktor zu ermitteln.

4.10 Lieferqualität

Bei der Bewertung der Qualitätskonstanz verschiedener Lieferungen sind für die einzelnen Materialien Merkmale festzulegen. Diese Merkmale sind so auszuwählen, daß die Materialien verschiedener Lieferungen als baupraktisch identisch bezeichnet werden können, wenn sie - im Rahmen bestimmter Toleranzen - hinsichtlich der Merkmale identisch sind. Außerdem ist bei der Auswahl der Merkmale der dazugehörige Prüfaufwand zu berücksichtigen, der insgesamt in einem ausgewogenen Verhältnis zu dem Schaden stehen muß, der durch die Verarbeitung mangelhaften oder falschen Materials entstehen kann. Unter diesen Gesichtspunkten werden folgende Merkmale ausgewählt :

- Farbton
- Viskosität
- Dichte
- nichtflüchtige Anteile und Glührückstand
- Bindemitteltyp
- Festkörpervolumen

In den folgenden Abschnitten ist die Bestimmung der Bewertungskriterien beschrieben. Im Einzelfall können weitere Bewertungskriterien hinzugenommen werden (z.B. Faserart und -anteil bei faserbewehrten Materialien), die aber hier nicht behandelt werden. Auf die Anzahl der Prüfungen in Abhängigkeit von den verarbeiteten Mengen und dem Beurteilungszeitraum sowie auf die Zuordnung zu Eigen- und/oder Fremdüberwachung wird hier nicht eingegangen.

4.10.1 Farbton

Häufig werden in Produktpaletten die Farbtöne auf das Farbregister RAL 840 HR abgestimmt und sind dann durch Angabe der betreffenden Nummer zu beschreiben. Zulässige Farbabweichungen einer Lieferung gegenüber dem Farbmuster auf der jeweiligen Registerkarte oder gegenüber anderen Lieferungen werden dort jedoch nicht angegeben. Entsprechende Toleranzen sind für den Einzelfall zu vereinbaren.

Bei der Festlegung derartiger Toleranzen (z.B. auf der Grundlage der Farbabstände nach DIN 6174) für Betonbeschichtungen sind einerseits die Möglichkeiten späterer farblicher Veränderungen infolge Witterungseinflüssen zu berücksichtigen, andererseits auch der mit enger gewählten Toleranzen stark anwachsende Produktionsaufwand. Farbabweichungen zwischen den Materialien verschiedener Gebinde einer Produktionscharge können bei ausreichender Erfahrung und Sorgfalt des Herstellers soweit ausgeschlossen werden, daß sie dem Auge auf einer einheitlich belichteten, zusammenhängenden Ebene nicht auffallen. Auf die sehr aufwendige Überprüfung der Farbkonstanz innerhalb einer Produktionscharge kann daher i.a. verzichtet werden. Für die Beurteilung von Farbabweichungen zwischen den Materialien verschiedener Produktionschargen werden Beschichtungsfilme auf einer Polypropylenfolie aufgebracht und bis zur Prüfung sieben Tage bei Raumklima im Dunkeln gelagert.

4.10.2 Viskosität

Die Viskosität wird nach DIN 53 211 durch Angabe der Auslaufzeit mit dem DIN - Becher 4 bestimmt. Bei Materialien mit hohem Schergefälle wird entsprechend DIN 53 214 ein Rotationsviskosimeter verwendet.

4.10.3 Dichte

Die Dichte wird nach DIN 53 217 Teil 2 mit einem Pyknometer bestimmt.

4.10.4 Nichtflüchtige Anteile und Glührückstand

Die nichtflüchtigen Anteile werden nach DIN 53 216 Teil 1 bestimmt. Sie sind derjenige Massenanteil, der nach Lagerung z.B. über 3 Stunden bei 100 °C als Rückstand verbleibt.

Der Glührückstand wird nach DIN 53 568 Teil 1 für eine Glühtemperatur von 550 °C bzw. zu gegebener Zeit der Pigmentgehalt nach DIN 55 678 -1986E- Teil 2 ermittelt. Diese Untersuchung entfällt, wenn bei den Vorbereitungen der infrarotspektroskopischen Untersuchung (s. Abschnitt 4.10.5) der Pigmentgehalt durch Zentrifugieren nach DIN 55 678 -1986 E- Teil 1 bestimmt wird.

4.10.5 Bindemitteltyp

Enthält das betreffende Material (Einkomponentenmaterial oder Einzelkomponente eines Mehrkomponentenmaterials) Wasser, wird zunächst ein Film hergestellt, über 24 Stunden bei Raumklima getrocknet und anschließend unter Erwärmung in einem geeigneten Lösemittelgemisch gelöst. Soweit diese Lösung bzw. das ursprünglich belassene Material neben dem Bindemittel auch Lösemittel und Farbmittelanteile enthält, sind diese durch dreimaliges Zentrifugieren mit einem geeigneten Lösemittelgemisch und anschließendes Dekantieren sowie durch eine definierte Wärmebehandlung abzusondern. Im Rahmen dieses Vorganges wird durch entsprechende Wägungen auch der Pigmentgehalt (s. DIN 55 678 -1986E- Teil 1,) bestimmt. Das so gewonnene Bindemittel wird auf eine Kaliumbromidscheibe aufgetragen, nochmals definiert wärmebehandelt und - sofern der Film keine ausreichende Ablaufbeständigkeit aufweist - mit einer zweiten Kaliumbromidscheibe abgedeckt. Dieser Film wird in Durchstrahltechnik infrarotspektroskopisch nach DIN 51 451 -1984E- untersucht. Wenn möglich wird durch Vergleich mit Referenzspektren der Bindemitteltyp bestimmt. Anderenfalls dient das aufgenommene Spektrum nur zur Überprüfung der gleichmäßigen Lieferqualität.

4.10.6 Festkörpervolumen

Das Festkörpervolumen ist das Verhältnis des Volumens eines trockenen Anstrichfilms zum Volumen des applizierten Anstrichstoffes (einschließlich flüchtiger Bestandteile) und wird nach DIN 53 219 bestimmt.

4.11 Lagerfähigkeit

Die Lagerfähigkeit wird zunächst im Rahmen einer Beurteilung der einzelnen Materialien, die jeweils in einwandfreien, ungeöffneten Originalgebinden über einen bestimmten Zeitraum nach Angaben des Herstellers, jedoch mindestens 6 Monate bei Raumklima gelagert worden sind, nach Augenschein bewertet. Beim Öffnen der Gebinde wird auf Anzeichen für chemische Reaktionen - auch mit der Gefäßwandung - geachtet. Nach praxisüblichem Aufrühren werden die Viskosität (s. Abschn. 4.10.2) und die Homogenität (Klümpchen, Schlieren) beurteilt. Im Zweifelsfall sind zusätzlich technologische Untersuchungen (nach Abschnitt 4.6, Feuchtigkeitshaushalt sowie Abschnitt 4.9, Rißüberbrückung) an einem entsprechenden Beschichtungsfilm durchzuführen. Gegebenenfalls ist die Lagerungszeit auf 6 Monate zu reduzieren und die Bewertung zu wiederholen. Eine Lagerfähigkeit unter 6 Monaten ist i.a. nicht praxisgerecht.

4.12 Verarbeitbarkeit

Die Herstellung eines einwandfreien Beschichtungsfilmes ist bei einfacher Verarbeitbarkeit der Materialien eher gewährleistet. Wesentliche Merkmale bei der Applikation sind Benetzung, Blasenbildung und Verlauf sowie die Neigung zu Läuferbildung an Wänden, ferner die Auskleidung bzw. Überbrückung von Poren des Untergrundes.

Der praktische Verbrauch ist mit den Angaben der zugehörigen technischen Merkblätter/Produktinformationen zu vergleichen. In diesem Zusammenhang ist auch die Abstimmung der Materialkonsistenz auf die vorgesehenen Applikationsgeräte (z.B. Walze, Spritzanlage) im Hinblick auf einen zügigen Verarbeitungsvorgang zu beurteilen. Ein wesentlicher Gesichtspunkt ist auch die Temperaturspanne, innerhalb derer eine einwandfreie Verarbeitung möglich ist und der anschließende Trocknungsprozeß höchstens verzögert bzw. beschleunigt, jedoch ohne signifikante Qualitätseinbuße im Endzustand abläuft.

Im allgemeinen können die hier aufgeführten Eigenschaften und Merkmale bei der Prüfkörperstellung zu den vorangegangenen Abschnitten bewertet werden. Für eine zuverlässige Abgrenzung der für die Verarbeitung zulässigen Temperaturspanne sind jedoch zusätzliche Untersuchungen erforderlich. Dafür werden an Prüfkörpern, die bei 5 °C (Materialtemperatur, Untergrundtemperatur) beschichtet und anschließend über 7 Tage - ebenfalls bei 5 °C - gelagert worden sind, nach weiteren 28 Tagen Lagerung bei Normalklima die Merkmale Untergrundhaftung (s. Abschn. 4.5) und Dehnfähigkeit im Reißbereich (s. Abschn. 4.9) untersucht.

5. Beanspruchung vor Bestimmung von Bewertungskriterien

Schutzmaßnahmen an Oberflächen von Stahlbetonbauteilen sind in erster Linie im Außenbereich notwendig, wo unter anderem mit einer Witterungsbeanspruchung gerechnet werden muß. In unseren Breiten umfaßt diese Witterungsbeanspruchung folgende Faktoren:

- Wasser;
- erhöhte Temperaturen;
- stark wechselnde Temperaturen (vor allem in der kalten Jahreszeit);
- kurzweilige Strahlung (UV-Strahlung);
- saure Gase (z.B. Schwefeldioxid) als zusätzliche Umweltbeanspruchung.

Die beschriebenen Witterungs- und Umweltfaktoren werden durch künstliche Klimabeanspruchungen simuliert.

Die Alterung von Baustoffen wird in erster Linie durch die Temperatureinflüsse bewirkt, d.h. der Nachweis des Alterungsverhaltens erfolgt durch entsprechende Temperaturbeaufschlagung. Ein weiterer Abbau- bzw. Alterungsfaktor für Kunststoffe stellt die UV-Strahlung dar. Die Feuchtigkeitsbeanspruchung hat vor allem Quell- und Schwindvorgänge in Folge wechselnden Wassergehaltes zur Folge. Bei schroffen Temperaturwechseln - vor allem in der kalten Jahreszeit, in der die Kunststoffe temperaturbedingt höhere E-Moduli und ein geringes Dehnvermögen aufweisen - erfolgt eine starke Belastung der Zwischenschichthaltung in den jeweiligen Sanierungssystemen.

Sofern nichts anderes erwähnt wird, ist jeder Prüfkörper - freier Film oder beschichteter Betonkörper - nach der Applikation über 7 Tage bei Normalklima NK 23/50 - 2 DIN 50014 zu lagern. Die als Untergrund dienenden Betonkörper müssen dabei mindestens der Festigkeitsklasse B 25 nach DIN 1045 entsprechen.

Im folgenden werden die verschiedenen Beanspruchungen, denen Prüfkörper vor der Bestimmung der einzelnen Bewertungskriterien ausgesetzt werden, aufgeführt, soweit sie nicht bereits in Abschnitt 4 angegeben sind. In Anlage 5.1 sind die zu prüfenden Kombinationen von Bewertungskriterium mit Beanspruchung zusammengestellt, in den Anlagen 5.2 bis 5.4 die Anforderungen an die Bewertungskriterien. Die Kombinationen in Anlage 5.1 sind unter dem Gesichtspunkt der Optimierung des Verhältnisses von Untersuchungsaufwand zu Aussagekraft ausgewählt. Die Anforderungen sind i.a. Erfahrungswerte aus eigenen Untersuchungen oder aus dem Schrifttum.

5.1 Xenonbogenbestrahlung mit Beregnen

Die Beanspruchung wird nach DIN 53 387 durchgeführt. Dabei ist der Zyklus A zu verwenden, der für die Dauer des Beregnens 18 min vorsieht, für die Trockendauer 102 min.

5.2 Kondenswasser-Konstantklima

Diese Beanspruchung wird in DIN 50 017 unter der Bezeichnung KK 40/100 beschrieben. Der Prüfkörper wird dabei einer Lufttemperatur von 40 °C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 % ausgesetzt.

5.3 Frost-Tau-Wechselbeanspruchung

Es werden zwei Zyklen unterschieden:

Zyklus I 2 Stunden in Luft bei -20 °C
 2 Stunden in Wasser bei +20 °C
 16 Stunden in Luft bei +60 °C
 4 Stunden in Wasser bei +20 °C

Zyklus II 2 Stunden in konzentrierter Kochsalz-
 lösung bei -15 °C
 2 Stunden wie bei Zyklus I
 16 Stunden wie bei Zyklus I
 4 Stunden wie bei Zyklus I

Zyklus II entspricht dem in /5.3.1/ für die Temperaturwechselprüfung vorgesehenen Zyklus. Zur Information kann auch an nach Zyklus II beanspruchten Prüfkörpern der Chloriddurchgang nach Abschnitt 4.8 bestimmt werden.

5.4 Wärmebeanspruchung

Zur Simulation einer natürlichen Alterung wird der Prüfkörper über 28 Tage bei 60 °C in einem Trockenofen gelagert.

5.5 Kondenswasser-Wechselklima

Es werden zwei Zyklen unterschieden:

Zyklus I (entsprechend DIN 50017 - KFW)

8 Stunden bei 40 °C und 100 %
relativer Luftfeuchtigkeit
16 Stunden bei Raumklima

Zyklus II (entsprechend DIN 50018 - SFW 0.2 S)

wie Zyklus I, jedoch wird die Luft
während der achtstündigen Phase zusätzlich
mit ca. 0.07 Vol-% Schwefeldioxid (SO₂)
angereichert.

5.6. Freibewitterung

Für die Freibewitterung wird der Prüfkörper an einer Stelle im Freien ausgelegt, deren Atmosphäre für die am Bauwerk zu erwartende Situation repräsentativ ist. Beginnend zwischen dem 1. März und dem 1. Mai dauert die Freibewitterung ein Jahr. Die zu beanspruchende Fläche ist dabei um 45 ° gegen die Horizontale geneigt und nach Süden ausgerichtet. Im übrigen wird auf DIN 53 166 verwiesen.

6. Beurteilung

In Abhängigkeit von den Versuchsergebnissen lautet die Beurteilung:

Das Beschichtungssystem erfüllt die Anforderungen hinsichtlich der Anwendung

- im Fassadenbereich ohne Sockelzone
- im Fassadenbereich mit Sockelzone
- im Fassadenbereich mit Sockelzone und bei nichtbefahrenen Verkehrsflächen

Werden die Anforderungen nur in einzelnen Merkmalen (z.B. Farbechtheit) nicht erreicht, kann u.U. ein sinnvoll eingeschränkter Anwendungsbereich (z.B. nur stark gegliederter Fassadenbereich) angegeben werden.

7. Durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse

Exemplarisch wurden für verschiedene Beschichtungsmaterialien einzelne Beurteilungskriterien bestimmt. Die Ergebnisse sind in Anlage 7.1 ff zusammengestellt. Eine abschließende Beurteilung einzelner Materialien hinsichtlich ihrer Eignung für Beschichtungen ist damit nicht möglich. Dennoch sollen hier Tendenzen angegeben werden, wie sie sich auch bei der Beurteilung von Schadensfällen abzeichnen.

Wie bereits in Abschnitt 1.2 erwähnt, kann eine Oberflächenbehandlung als Imprägnierung, als Versiegelung

oder als Beschichtung ausgeführt werden. Die folgenden Abschnitte enthalten Informationen über die einzelnen Methoden sowie die dabei eingesetzten Materialien.

7.1 Imprägnierungen

Als eine der Möglichkeiten, einen Beton im besonderen vor der Wasseraufnahme zu schützen und gleichzeitig eine gewisse Verfestigung der oberflächennahen Zonen zu erreichen, haben sich Imprägnierungen bewährt. Derartige Imprägnierungen werden unterteilt in hydrophobierende Produkte und in Produkte mit gleichzeitig verfestigenden Eigenschaften. Zur Anwendung kommen vorzugsweise Silane, Siloxane und Siliconharze. Häufig werden auch Mischungen von Acrylat-harzlösungen mit Zusatz von Siliconharzen zur Imprägnierung von Betonoberflächen verwendet. Diese Materialkombination hat sich bewährt. Es liegen hierüber vereinzelt Erfahrungen aus einem Zeitraum von über 15 Jahren vor. Bei dieser Aussage ist allerdings zu berücksichtigen, daß hier nur spezielle Acrylatharze und Siliconharze verwendet werden dürfen, die eine hohe Beständigkeit gegenüber Alkalität und Witterungseinflüssen aufweisen. Die Anwendung von Acrylatmischpolymerisaten und Polyurethan-Harzlösungen hat sich weniger bewährt.

7.2 Versiegelungen

Wie der Name schon sagt, haben Versiegelungen die Aufgabe, die an der Oberfläche des Betons vorhandenen Poren zu schließen und somit ein Eindringen von Wasser und Salzen zu vermeiden. Gleichzeitig wird aber auch eine gewisse Absperrwirkung gegen Gase durch die Versiegelung bewirkt.

Als übliche Versiegelungsmittel werden häufig lösemittelhaltige Harzlösungen und lösemittelfreie Zweikomponentensysteme verwendet. Nach den bisherigen Erfahrungen treten bei der Verwendung von besonders ausgewählten lösemittelfreien Zweikomponenten-Epoxidharzmaterialien keine Probleme auf. Bei der Anwendung von lösemittelhaltigen Materialien ist nicht nur das Problem der alkalibeständigen Harzkomponenten, sondern auch das Eindringen der Lösemittel in den Beton vorhanden. Die beim Aufbringen der lösemittelhaltigen Versiegelungsmittel in den Beton eindringenden Lösemittel können u.U. zur Ablösung der Versiegelung oder aber zur Blasenbildung in nachfolgenden Schichten führen.

7.3 Beschichtungen

7.3.1 Anorganische Beschichtungen

Als klassischer Betonschutz, der sich auch zur Farbgestaltung eignet, haben sich die Silicat-Farben aufgrund ihrer langen Haltbarkeit und Verträglichkeit mit dem alkalischen Untergrund bewährt. Hinzu kommt, daß die Silicat-Anstriche eine chemische Reaktion mit der Betonoberfläche eingehen. Bei einer frischen Betonoberfläche bilden sich aus den Alkalisilicaten in Verbindung mit dem Kohlendioxid der Luft beständige Calciumsilicate und wasserlösliche Alkalicarbonate. Bei einer neutralisierten bzw. carbonatisierten Betonoberfläche entstehen aus den Alkalisilicaten in Verbindung mit Kohlendioxid Siliciumdioxid und Alkalicarbonate, wobei das Siliciumdioxid-Gel entsteht, welches einen Teil der an der Oberfläche befindlichen Betonporen verstopfen kann. Auch kann durch das Calciumsilicat eine gewisse porenverstopfende Wirkung erreicht werden.

Die bei den Reaktionen entstandenen Alkalicarbonate werden bei der Beanspruchung durch Wasser ab- bzw. ausgewaschen. Um das Eindringen von Wasser und das Auswaschen der Alkalicarbonate möglichst zu verhindern, werden entweder den Silicat-Farben bestimmte Kunststoffe zugesetzt oder aber nach dem Aufbringen der Silicat-Farben die Anstrichflächen mit einer stark wasserabweisenden Imprägnierung behandelt. Die letztere Methode stellt zwar einen zusätzlichen Arbeitsgang dar, hat sich aber als Betonschutz bewährt. Inwieweit sich die Offenporigkeit der Silicat-Farbanstriche nachteilig auf die Schutzfunktion gegenüber sauren Gasen auswirkt, muß noch genauer untersucht werden.

7.3.2 Organische Beschichtung

Die meisten Beschichtungsarbeiten an Betonoberflächen werden zur Zeit entweder mit Dispersionen oder lösemittelhaltigen Anstrichstoffen ausgeführt. Die Brauchbarkeit dieser Materialien hängt nicht nur von dem verwendeten Bindemittel (Acrylat oder Polyvinylacetat) ab, sondern ist auch von den verwendeten Füllstoffen und der mengenmäßigen Zusammensetzung (Bindemittel-Füllstoff-Verhältnis) abhängig. Einige Beschichtungsmaterialien werden auch so formuliert, daß sie ein elasto-plastisches Verhalten aufweisen, d.h. sie können Risse bis zu einer gewissen Breite überbrücken.

Für die Diffusionseigenschaften gegenüber Kohlendioxid scheint die Luftfeuchtigkeit nur eine untergeordnete Rolle zu spielen (s. Anlagen 7.6.1 und 7.6.2). Bezüglich der sogenannten Chloriddiffusion durch Beschichtungen hat sich im Rahmen des Forschungsvorhabens herausgestellt, daß geeignete Kunststoffbeschichtungen das Eindringen von Chloriden in den zu schützenden Beton deutlich behindern können (s. Abschnitt 4.8). Im Falle der Ergebnisse in Anlage 7.8 tritt allerdings ein Chloriddurchgang durch die geprüfte Beschichtung auf,

wird aber vermutlich innerhalb baupraktisch relevanter Zeiten ohne direkte Folgen für die Stahleinlagen bleiben, solange die Chloride zwar durch die Beschichtung dringen und unter der Beschichtung eine hohe Konzentration nachweisbar ist, durch die wasserabweisende Wirkung der Schutzschicht jedoch die notwendige Feuchtigkeit zum Weitertransport in den Beton nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung gestellt wird (s. /7.3.2.1/). Der genaue Zusammenhang zwischen Betonfeuchtigkeit und zeitabhängigem Chloridtransport sowie der Transportmechanismus müßten jedoch in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

Unter Beschichtungen werden häufig auch Grundierungen angeordnet, welche entweder als Imprägnierung oder als Versiegelung konzipiert sind.

Als besonders geeignet haben sich Epoxidharz-Grundierungen und Polyurethan-Deckbeschichtungen erwiesen, wobei von diesen Systemen ein optimaler Schutz gegenüber dem Eindringen von Schadgasen in den Beton erreicht wird. Der Nachteil dieser Systeme ist, daß die "Atmungsaktivität" der beschichteten Betonfläche praktisch nicht mehr vorhanden ist. Die Lichtbeständigkeit und Wetterbeständigkeit dieser Beschichtungssysteme wird von den Polyurethan-Deckbeschichtungen erreicht, während die besonders hohe Alkalibeständigkeit durch die lösemittelfreie Epoxidharz-Beschichtung erzielt wird.

Ob jedoch eine derartig aufwendige Beschichtung der Betonoberfläche notwendig und sinnvoll ist, hängt im wesentlichen von der Beanspruchung und der Nutzung des Bauteils ab, u.U. auch von der Höhe der Gerüstkosten bei schlechter Zugänglichkeit.

In den meisten Fällen sind die üblichen lösemittelhaltigen alkali- und witterungsbeständigen Anstrichstoffe mit nicht zu hohem Füllstoffgehalt als Betonschutz ausreichend. Hierbei sind die Acrylatharze die meistverwendeten Bindemittel und haben sich seit Jahren bewährt.

In Bereichen mit weniger starker Feuchtigkeitsbeanspruchung - wie üblicherweise an Fassaden - werden bei entsprechender Vorbehandlung des Untergrundes für die Betonsanierung mit Erfolg Acrylatharzdispersionen eingesetzt.

8. Zusammenfassung

Bei Betrachtung des Korrosionsvorganges von Bewehrungsstählen sowie der chemischen Prozesse im Zementstein infolge Einwirkung von Atmosphärien stellt sich heraus, daß nur einwandfrei gestaltete und ausgeführte Stahlbetonbauwerke unter normalen atmosphärischen Bedingungen eine ausreichende Dauerhaftigkeit des verwendeten Baustoffes Stahlbeton gewährleisten.

Ist jedoch der die Bewehrung überdeckende Beton porös oder stark gerissen, ist der für die Dauerhaftigkeit wesentliche Korrosionsschutz i.a. nicht mehr vorhanden. Selbst wenn an der Bauteiloberfläche noch keinerlei Folgeschäden derartiger Mängel erkennbar sind, sollte dann der Korrosionsschutz durch zusätzliche Maßnahmen ergänzt werden. Im Bereich von Fassaden und nicht befahrenen Verkehrsflächen bietet sich dabei eine Oberflächenbehandlung des Betons in Form einer Beschichtung an.

Kriterien für die Beurteilung derartiger Beschichtungen sowie Prüfverfahren zur Ermittlung entsprechender Kennwerte sind in diesem Bericht behandelt. Besonders hervorzuheben sind dabei die Verfahren zur Ermittlung der Kohlendioxid-diffusion im Feuchtbereich und der Sauerstoffdiffusion.

In einer Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Untersuchungen an Stahlbetonbauwerken, die seit unterschiedlich langer Zeit beschichtet sind (s. /8.1/), und der Laborprüfungsergebnisse der entsprechenden Betonsanierungsmaterialien wäre nun abzuklären, inwieweit die vorgeschlagenen Kriterien und die zugehörigen Anforderungen für eine zuverlässige Beurteilung im Labor ausreichen. Ferner müßten die Diffusionseigenschaften der Beschichtungsmaterialien im Hinblick auf die für die im Zementstein ablaufenden Reaktionen ebenfalls relevanten Schadgase NO_x und SO_2 untersucht werden.

Durch vergleichende Analyse der Ergebnisse aus solchen Untersuchungen können dann voraussichtlich auch material-, insbesondere bindemittelspezifische Schwächen und Stärken der einzelnen Beschichtungen herausgefiltert werden. Derartige Informationen können zusammen mit der Angabe besonders schwer zu erfüllender Anforderungen eine wertvolle Hilfe für die Praxis bei der grundsätzlichen Formulierung von Beschichtungen sowie beim Festlegen von Testreihen im Rahmen der weiteren Entwicklung sein.

9. Weitere Zielvorstellungen

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde schwerpunktmäßig die Prüfung von Oberflächenbehandlungen, welche sich auf die ganze Betonoberfläche erstrecken, behandelt. Die Untersuchung spezieller Maßnahmen in Bereichen, wo bereits infolge korrosiver Einflüsse Abplatzungen im Beton, welche z.B. durch korrodierende Stahleinlagen hervorgerufen wurden, vorliegen, hätten den Rahmen dieses Forschungsvorhabens gesprengt und müssen einer weiteren Arbeit vorbehalten bleiben. In diesem Zusammenhang ergeben sich dann weitere Fragen:

In welchen minimalen oder maximalen Dicken können Reparaturmörtel aufgetragen werden, um die notwendige Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit im verarbeiteten Zustand aufzuweisen ?

Inwieweit dürfen diese Reparaturmörtel, ggf. in Abhängigkeit von der jeweiligen Tiefe der Ausbruchstellen, von den physikalischen Kennwerten des Betons, wie thermische Längenänderungen und Elastizitätsmodul, abweichen um ihren Zweck noch erfüllen zu können ?

Was für Forderungen sind an den Korrosionsschutz der freiliegenden und eventuell freizulegenden Stahleinlagen zu stellen, um letztere vor weiterem Abbau durch flächige oder punktuelle

Korrosion, z.B. durch Elementbildung, zu schützen ?

Dieser Fragenkomplex interessiert vor allem, wenn ganzflächig wirksame Beschichtungen auf der Betonoberfläche nicht möglich oder nicht auf Dauer sichergestellt werden können. Hierzu gehören auch die Untersuchungen, ob es baupraktisch möglich ist, den Schutz nicht ausreichend überdeckter Stahleinlagen durch dichte Überzüge aus kunststoffgebundenen oder hydraulisch gebundenen Schichten herzustellen oder ob es sinnvoller ist, den Korrosionsschutz dieser Stahleinlagen durch über längere Zeit alkalisch reagierende Reparaturmörtel im Zusammenhang mit oder ohne Endbeschichtungen der Betonoberfläche sicherzustellen.

Was geschieht in Bereichen, wo die Schutzschicht auf freiliegenden oder nicht ausreichend geschützten Stahleinlagen nicht bis dahin geführt wird, wo der passive Schutz durch die Alkalität des umgebenden Betons gewährleistet ist ?

Angesichts fehlender Meßwerte für den Durchgang von Schadgasen wie SO_2 und NO_x durch Baustoffe, wird in Fachkreisen zur Zeit näherungsweise vorausgesetzt, daß eine Beschichtung, welche in der Lage ist, den CO_2 -Durchgang ausreichend zu vermindern, sich auch in bezug auf den Durchgang von Schadgasen entsprechend verhält.

Diese hier kurz angesprochenen Probleme sind in unserem Hause bereits andiskutiert worden und sollten in einem nachfolgenden Forschungsvorhaben gelöst werden.

10. Literaturverzeichnis

- /1.1.1/ Rehm, G., "Korrosionsschutz des Bewehrungsstahls in Beton unter praxisnahen Bedingungen". Tiefbau, Ingenieurbüro, Straßenbau 5 (1983)
- /2.1.1/ Krenkler, K., "Chemie des Bauwesens (Band 1)". Springer-Verlag Berlin-Heidelberg -New York, 1980
- /2.1.2/ Schwarz, H., "Untersuchungen über die Wirkung des Eisen(II)-Sulfates beim atmosphärischen Rosten und beim Unterrosten von Anstrichen". Werkstoffe und Korrosion, Hefte 2/1965 und 3/1965 (16. Jahrgang)
- /2.1.3/ Gouda, V.K. und W.Y. Halaka, "Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel (part I)". British Corrosion Journal, 1970 Volume 5, September
- /2.1.4/ Öchsner, W.Ph. u.a., "Einfluß der Sulfatphasen im Zementstein auf die Korrosion der Bewehrung im Beton." Bautenschutz und Bausanierung, Heft 3-1983
- /2.2.1/ Gunkel, P., "Die Zusammensetzung der flüssigen Phase erstarrender und erhärtender Zemente" Beton-Informationen, Heft 1/1983, 23. Jahrgang

- /2.4.1/ Hensel, W. "Chemische Reationen von Atmosphäriilien mit zementgebundenen Baustoffen". Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 11/1985
- /3.1.1.1/ Volkwein, A., " Anstriche als Korrosionsschutz der Bewehrung bei Sanierungen ?" in "2. international. Kolloquium 2.-4.9.1986 der Technischen Akademie Esslingen, Ostfildern" (Eigenverlag)
- /3.2.1.1/ Klopfer, H., "Die Carbonatisation von Sichtbeton und ihre Bekämpfung". Bautenschutz und Bausanierung Heft Nr. 3-1978
- /4.6.2.1/ Neisecke, J., "Aufgabe, Wirkung und Eignungsnachweis von Betonoberflächen-Schutzbeschichtungen" in "2. intern. Kolloquium 2.-4.9.1986 der Technischen Akademie Esslingen, Ostfildern" (Eigenverlag)
- /4.7.2.1/ Bedienungsanleitung für O₂-Permeometer Model 201 T , Fa. Createch, Albany, CA. USA (freundlicherweise zur Verfügung gestellt von der Firma Titmus in Aschaffenburg)
- /4.9.1/ Bau- und Prüfgrundsätze für Beschichtungen für Beton-, Putz- und Estrichflächen von Auffangwannen und Auffangräumen für wassergefährdende Flüssigkeiten - Fassung November 1982 - des Institutes für Bautechnik, Berlin

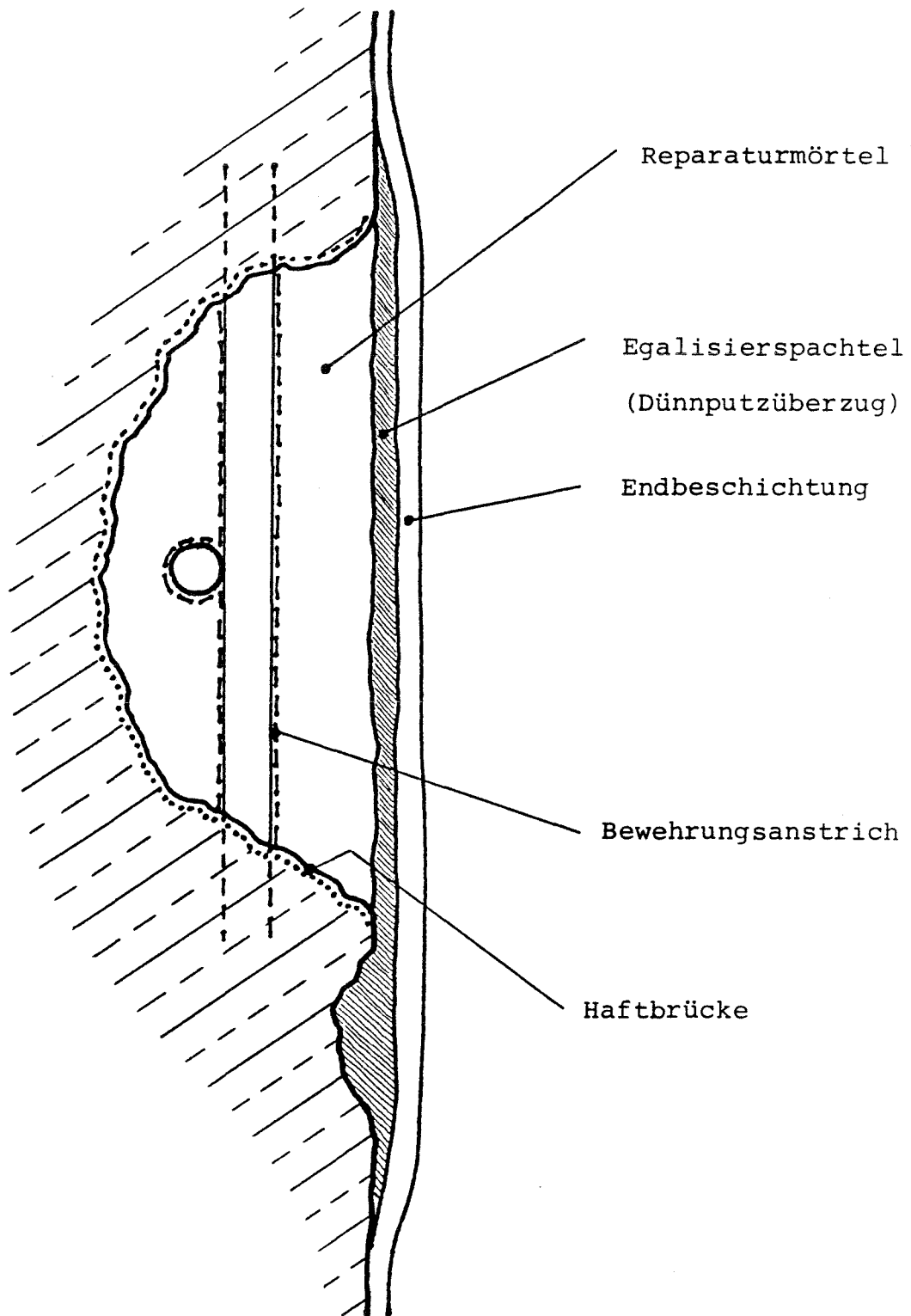
- /4.9.2/ Hächler, A., "Die Bedeutung von Laborprüfungen für die Qualitätssicherung von Betonbeschichtungen" in "2. internat. Kolloquium 2.-4.9.1986 der Techn. Akademie Esslingen, Ostfildern" (Eigenverlag)
- /5.3.1/ "Merkblatt für die Unterhaltung und Instandsetzung von Fahrbahndecken aus Beton (MIB), Teil: Ausbesserung von Oberflächen- und Kantenschäden mit Reaktionsharzmörtel (Ausgabe 1978)" der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen
- /7.3.2.1/ Lawatsch, K.-H. und A.Volkwein, "Eindringen von Chloriden in Abhängigkeit von der Feuchte (Chloriddiffusion)", erhältlich über "Informationszentrum Raum und Bau der Frauenhofer-Gesellschaft, Nobelstraße 12, 7000 Stuttgart 80" unter der Nummer F 1974
- /8.1/ Kordina, K. und J. Neisecke, "Sanierung von Betonoberflächen mittels Kunstharzmaterialien - Teil I -" (Forschungsbericht F 1720 zu einem vom Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau unter Az.: B I 5 - 80 01 77 - 35 geförderten Forschungsvorhaben)

Zusammenstellung der angeführten Normen:

DIN 1045
DIN 1164 Teil 1
DIN ISO 4628 Teil 4
DIN ISO 4628 Teil 5
DIN ISO 4624
DIN 6174
DIN 18558
DIN 50014
DIN 50017
DIN 50018
DIN 50021
DIN 51451 -1984 E-
DIN 52615 Teil 1
DIN 52617 -1984 E-
DIN 53122 Teil 1
DIN 53166
DIN 53209
DIN 53211
DIN 53214
DIN 53216 Teil 1
DIN 53217 Teil 2
DIN 53219
DIN 53387
DIN 53568 Teil 1
DIN 55678 -1986 E- Teil 1
DIN 55678 -1986 E- Teil 2

Zusammenstellung der Anlagen

- 1.2.1 Prinzipieller Aufbau einer sanierten Stahlbeton - Schad-
stelle (nicht maßstäblich!)
- 2.2.1 Analysendaten verschiedener Zemente (auszugsweise)
- 2.3.1.1 Chemische Teilreaktionen im Zementleim bzw. Zementstein
bei Vorhandensein von Wasser und Kohlendioxid
- 2.3.1.2 pH-Werte verschiedener Verbindungen des Zementleims bzw.
des Zementsteins und deren Löslichkeiten
- 2.3.2.1 Chemische Teilreaktionen im Zementleim bzw. Zementstein bei
Vorhandensein von Wasser, Sauerstoff, Schwefeldioxid und
Stickoxiden
- 4.7.1.1.1 Meßanordnung zur Bestimmung des Diffusionswiderstandes
eines trockenen Beschichtungsfilmes gegen Kohlendioxid
ohne gleichzeitige Wasserdampfdiffusion (nicht maß-
stäblich!)
- 4.7.1.2.1 Meßanordnungen zur Bestimmung des Diffusionswiderstandes eines
Beschichtungsfilmes gegen Kohlendioxid bei gleichzeitiger
Wasserdampfdiffusion (nicht maßstäblich!)
- 4.7.1.2.2 Erläuterungen zu Anlage 4.7.1.2.1
- 4.7.2.1 Meßanordnung zur Bestimmung des Diffusionswiderstandes eines
Beschichtungsfilmes gegen Sauerstoff (Prüftemperatur 35 °C)
- 4.7.2.2 Ersatzsystem (Stromkreis mit Ohmschen Widerständen) für
die Herleitung des Zusammenhanges zwischen dem theoretischen
Wert I und den Meßwerten I_0 , I_{Papier} und I_{tot}
- 5.1 Zu prüfende Kombinationen von Bewertungskriterien mit
Beanspruchungen
- 5.2 Anforderungen an die Bewertungskriterien
- bis 5.4
- 7.1 Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen
- bis
- 7.10



Prinzipieller Aufbau einer sanierten Stahlbeton-Schadstelle
(nicht maßstäblich!)

Analysendaten verschiedener Zemente (auszugsweise)

chemische Verbindung	PZ 35 F in Masse %	Z 45 F in Masse %	HOZ 35 L-NW/HS in Masse - %	PZ 35 F HS/NA in Masse - %
CaO Calciumoxid	63,30	63,11	48,43	63,80
MgO Magnesiumoxid	1,30	1,55	3,45	0,85
K ₂ O Kaliumoxid	1,28	1,15	0,91	0,48
Na ₂ O Natriumoxid	0,13	0,12	0,29	0,11

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87

Anlage 2.2.1

Chemische Teilreaktion im Zementleim bzw. Zementstein
bei Vorhandensein von Wasser (H₂O) und Kohlendioxid (CO₂)

	Reaktionen im Zementleim		Reaktionen im Zementstein		Reaktions- produkte
1	CaO (Calciumoxid)	+ H ₂ O →	Ca(OH) ₂ ²⁾ (Calciumhydroxid)	+ CO ₂ →	CaCO ₃ ¹⁾ + H ₂ O (Calciumcarbonat)
2	MgO (Magnesiumoxid)	+ H ₂ O →	Mg(OH) ₂ ²⁾ (Magnesiumhydroxid)	+ CO ₂ →	MgCO ₃ ¹⁾ + H ₂ O (Magnesiumcarbonat)
3	K ₂ O (Kaliumoxid)	+ H ₂ O →	2 KOH ⁴⁾ (Kaliumhydroxid)	+ CO ₂ →	K ₂ CO ₃ ⁴⁾ + H ₂ O ₂ (Kaliumcarbonat)
4	Na ₂ O (Natriumoxid)	+ H ₂ O →	2 NaOH ⁴⁾ (Natriumhydroxid)	+ CO ₂ →	Na ₂ CO ₃ ³⁾ + H ₂ O ₂ (Natriumcarbonat)
1) praktisch unlöslich; 2) schwer löslich; 3) mäßig löslich ; 4) leicht löslich					

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87

pH- Werte verschiedener Verbindungen
des Zementleims bzw. Zementsteins
und deren Löslichkeiten

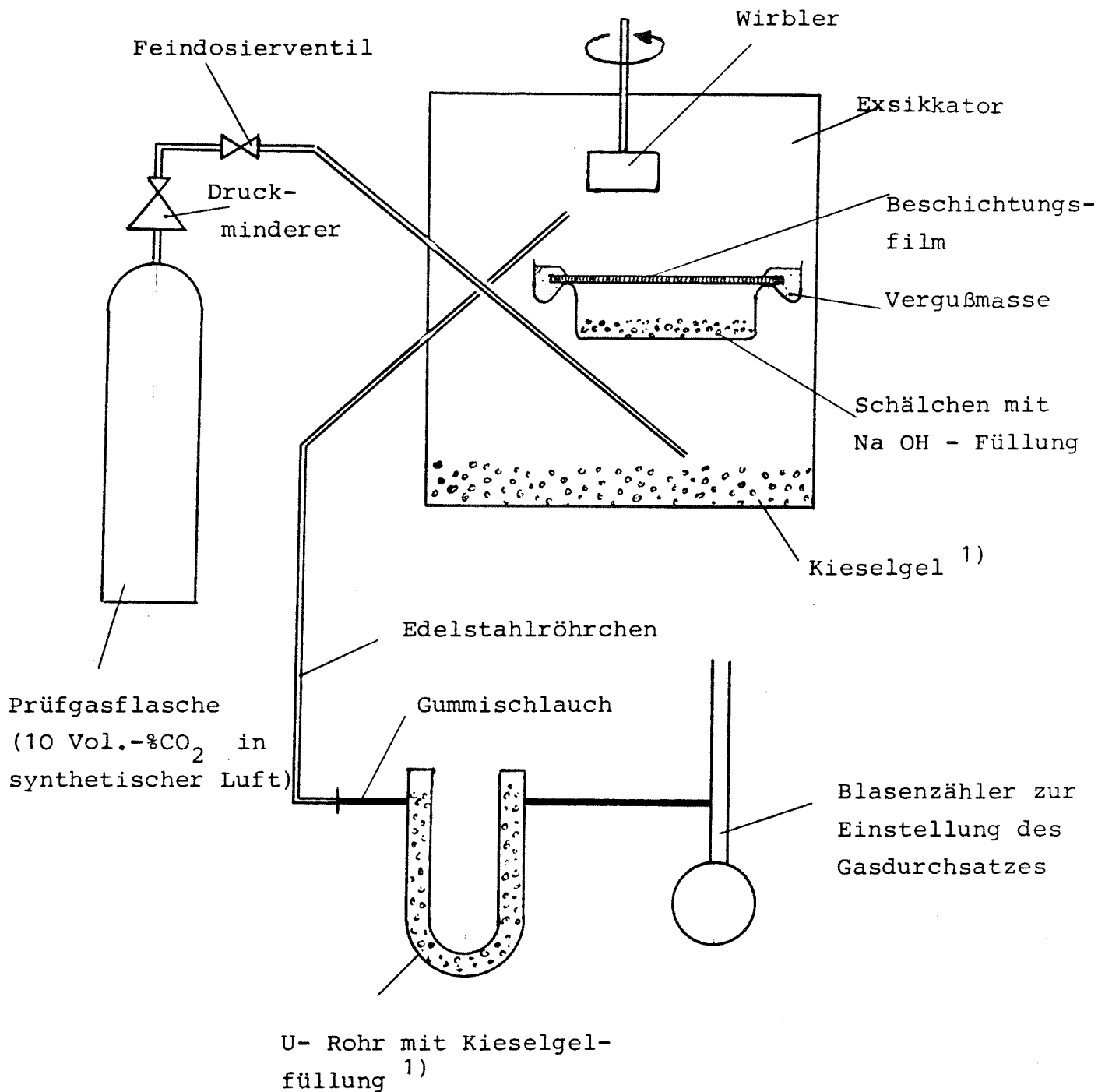
chemische Verbindungen (Formel)	pH- Wert einer wäßrigen Lösung bei 20° C	dazugehörige Konzentration in Masse - %	Löslichkeit in dest. Wasser (20°C) in g/ 100 ml
Calciumhydroxid (Ca (OH) ₂)	12,6	0,2 gesätt. Lösung	ca. 0,2
Magnesium- hydroxid (Mg (OH) ₂)	ca. 10	kleiner 0,1 praktisch unlöslich	kleiner 0,001
Kaliumhydroxid (KOH)	13,2 14,1	1 10	ca. 250
Natriumhydroxid (NaOH)	13,4 14,3	1 10	ca. 150
Kaliumkarbonat (K ₂ CO ₃)	11,6 12,5	1 20	ca. 120
Natriumkarbonat (Na ₂ CO ₃)	11,5 12,2	1 20	ca. 40

Chemische Teilreaktionen im Zementleim bzw. im Zementstein bei Vorhandensein von Wasser (H₂O), Sauerstoff (O₂), Schwefeldioxid (SO₂) und Stickoxiden (NO_x)

Reaktionen im Zementleim	Reaktionen im Zementstein	Reaktionsprodukte
$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Ca(OH)}_2$ <p>(Calciumoxid) (Calciumhydroxid) ²⁾</p>	$+ \text{SO}_2 \xrightarrow{\text{O}_2} \text{CaSO}_4$ <p>(Calciumsulfat) ²⁾</p> <hr/> $+ \text{NO}_x \xrightarrow{\text{O}_2} \text{Ca(NO}_3)_2$ <p>(Calciumnitrat) ⁴⁾</p>	<p>+ H₂O</p> <hr/> <p>+ H₂O</p>
$\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Mg(OH)}_2$ <p>(Magnesiumoxid) (Magnesiumhydroxid) ²⁾</p>	$+ \text{SO}_2 \xrightarrow{\text{O}_2} \text{MgSO}_4$ <p>(Magnesiumsulfat) ³⁾</p> <hr/> $+ \text{NO}_x \xrightarrow{\text{O}_2} \text{Mg(NO}_3)_2$ <p>(Magnesiumnitrat) ⁴⁾</p>	<p>+ H₂O</p> <hr/> <p>+ H₂O</p>
$\text{K}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2 \text{KOH}$ <p>(Kaliumoxid) (Kaliumhydroxid) ⁴⁾</p>	$+ \text{SO}_2 \xrightarrow{\text{O}_2} \text{K}_2\text{SO}_4$ <p>(Kaliumsulfat) ⁴⁾</p> <hr/> $+ \text{NO}_x \xrightarrow{\text{O}_2} 2 \text{KNO}_3$ <p>(Kaliumnitrat) ⁴⁾</p>	<p>+ H₂O</p> <hr/> <p>+ H₂O</p>
$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2 \text{NaOH}$ <p>(Natriumoxid) (Natriumhydroxid) ⁴⁾</p>	$+ \text{SO}_2 \xrightarrow{\text{O}_2} \text{Na}_2\text{SO}_4$ <p>(Natriumsulfat) ⁴⁾</p> <hr/> $+ \text{NO}_x \xrightarrow{\text{O}_2} 2 \text{NaNO}_3$ <p>(Natriumnitrat) ⁴⁾</p>	<p>+ H₂O</p> <hr/> <p>+ H₂O</p>
<p>1) praktisch unlöslich ; 2) schwer löslich ; 3) mäßig löslich ; 4) leicht löslich</p>		

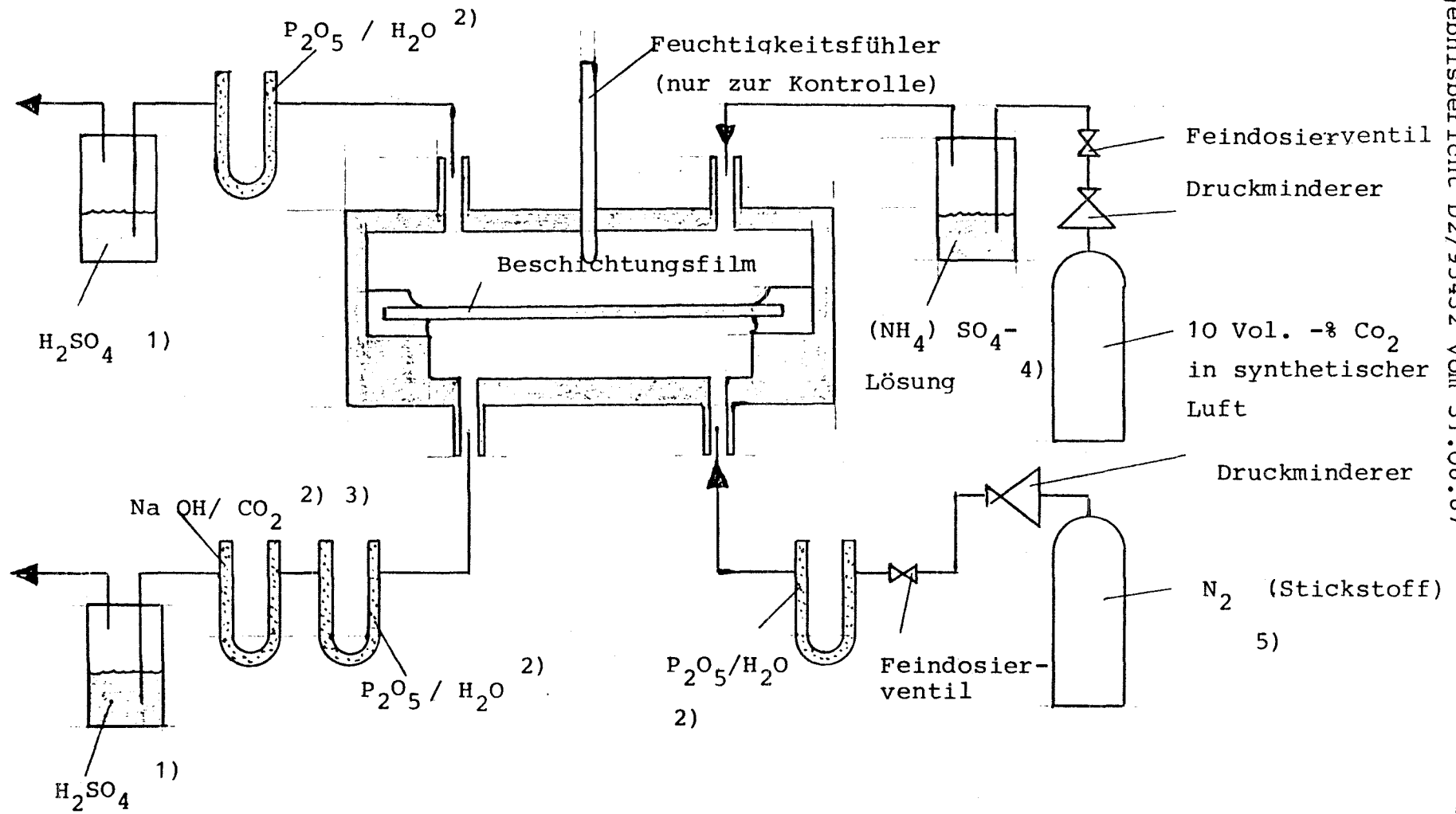
Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87



1) mit Feuchtigkeitsindikator zur Anzeige etwa eingedrungener Feuchtigkeit

Meßanordnung zur Bestimmung des Diffusionswiderstandes eines trockenen Beschichtungsfilms gegen Kohlendioxid ohne gleichzeitige Wasserdampfdiffusion (nicht maßstäblich!)



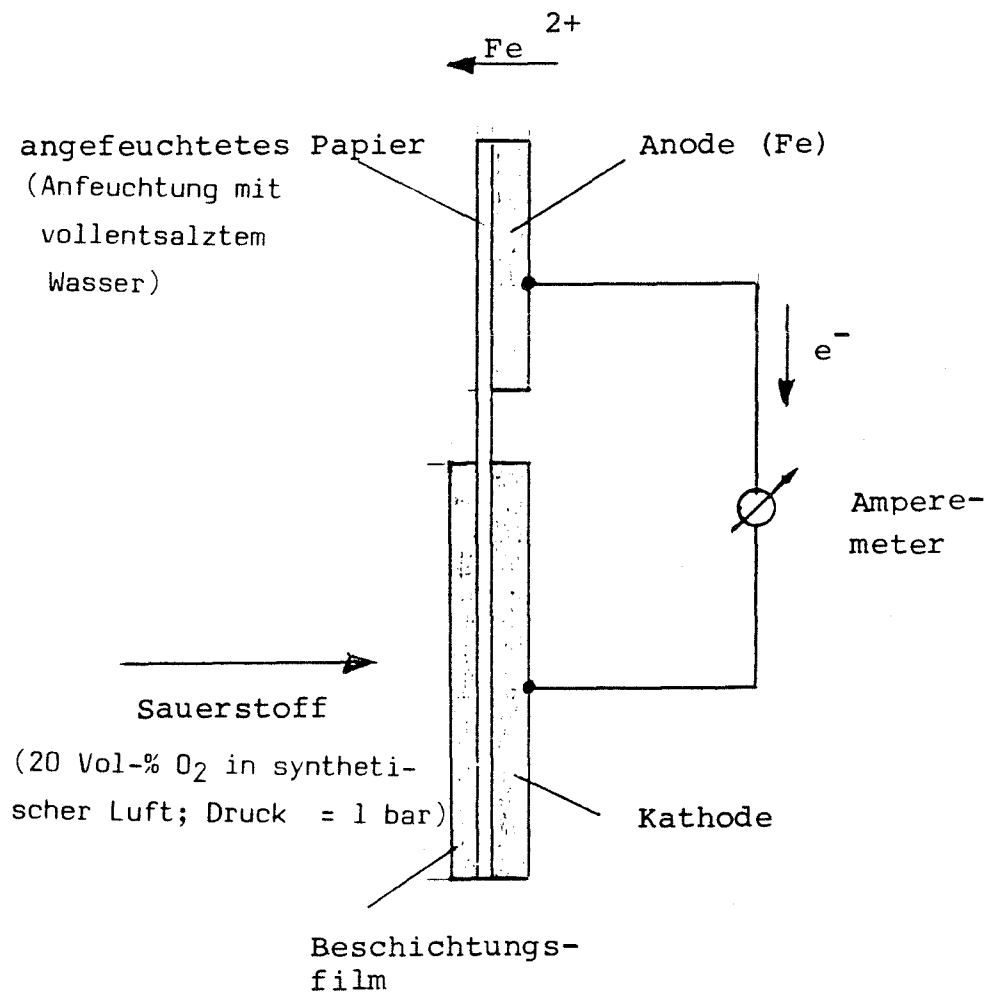
r Meßanordnung zur Bestimmung des Diffusionswiderstandes eines Beschichtungsfilms
 gegen Kohlendioxid bei gleichzeitiger Wasserdampfdiffusion (nicht maßstäblich!)
 Erläuterungen siehe Anlage 4.7.1.2.2

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87

Erläuterungen zu Anlage 4.7.1.2.1

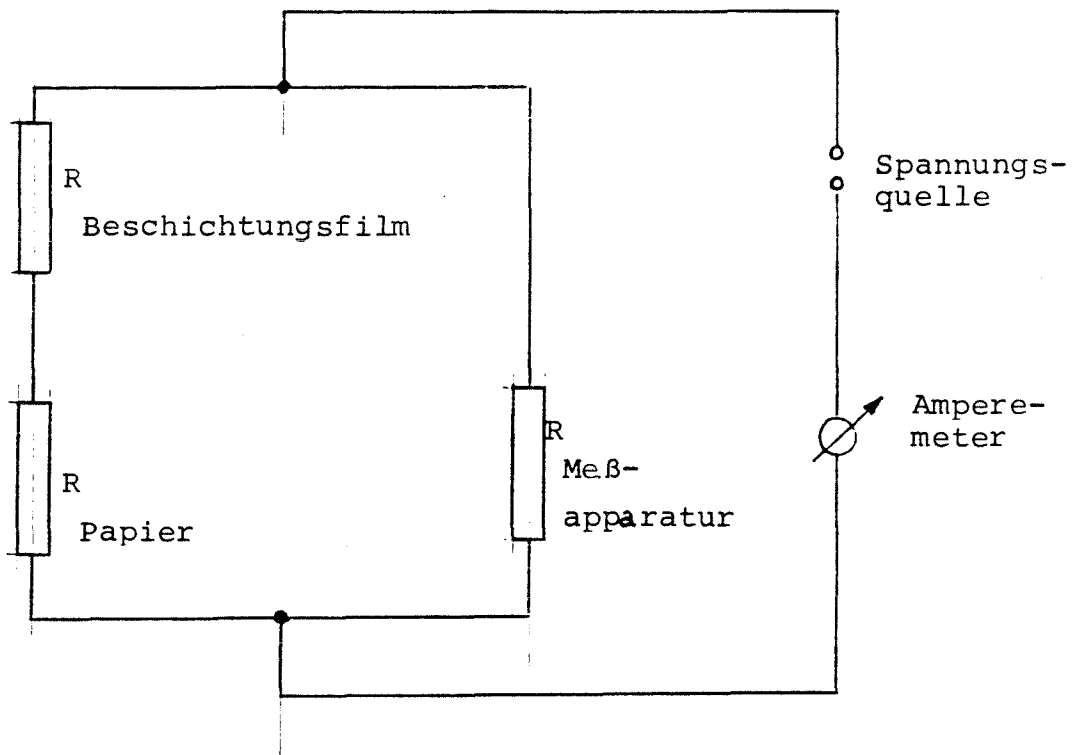
- 1) Diese Anordnung verhindert bei etwaigen Betriebsstörungen (Druckabfall, Umkehrung des Gasstromes) das Eindringen von Luftfeuchtigkeit von außen.
- 2) Die Durchleitung des Gasstromes durch ein mit Absorptionsmittel gefülltes U-Rohr dient der vollständigen Absorption einzelner Gasanteile.
Vor dem Schrägstrich ist das Absorptionsmittel (P_2O_5 = Phosphorpentoxid ; NaOH = Natriumhydroxid) angegeben, dahinter der zu absorbierende Gasanteil (H_2O = Wasserdampf ; CO_2 = Kohlendioxid).
- 3) Durch Bestimmung der Gewichtszunahme dieses U- Röhrcens wird die durch den Beschichtungsfilm diffundierte CO_2 - Menge ermittelt.
- 4) Nach der Durchleitung des zunächst trockenen Gasstromes durch diese Anordnung beträgt die relative Feuchtigkeit des Gases ca. 70 % .
- 5) Der Stickstoff dient als inerter Träger für die durch den Beschichtungsfilm diffundierten Gase.

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87



Meßanordnung zur Bestimmung des Diffusionswiderstandes eines Beschichtungsfilms gegen Sauerstoff (Prüf-temperatur = 35° C)

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87



Im Ersatzsystem werden die Diffusionswiderstände an Beschichtungsfilm und Papier durch Ohmsche Widerstände ersetzt, die im Zusammenhang mit der Sauerstoffkorrosion spannungserzeugender Bereiche durch eine Spannungsquelle.

Ersatzsystem (Stromkreis mit Ohmschen Widerständen) für die Herleitung des Zusammenhanges zwischen dem theoretischen Wert I und den Meßwerten I_0 , I_{Papier} und I_{tot} .

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87

Zu prüfende Kombinationen von Bewertungskriterien
mit Beanspruchungen

Bewertungskriterium (in Klammern d. betr.Abschn.)	Prüfk.							
Verschmutzungsneigung (4.2)	A B	X						X
Bewuchsneigung (4.2)	B							X
augenscheinliche Veränderungen (4.3)	A B	X	X	X	XX	X	XX	X
Abwitterung (4.4)	A	X						
Untergrundhaftung (4.5)								
Beton schalungsglatt	B		X		XX		XX	X
Beton gestrahlt	B		X	X	X		XX	X
Egalisierspachtel	B		X	X	X			X
Dehnfähigkeit im Ribbereich:								
Beton schalungsglatt bei NK	C		X				X	X
bei 0°C	C							
Beton gestrahlt bei NK	C		X				X	X
bei 0°C	C							
<u>Erläuterungen</u>								
A: freier Film								
B: Betonkörper								
C: Betonkörper nach Abschnitt 4.9								
1) bei Betonkörpern sind die nbeschichteten Flächen zu versiegeln							(1	
2) nur im Sockelbereich und bei nicht befahrenen Verkehrs- flächen. Bei nicht befahrenen Verkehrsflächen läuft die Beanspruchung über 20 Zyklen, sonst über 10 Zyklen.							OS mit SO ₂	
	Beanspruchung (in Klammern der betr. Abschnitt)	Xerobogenbestrahlung mit Benässen (5.1) ; 1500 h	Normal Klima DIN 500 23/50-2; 28°C	Kondenswasserkonstantklima (5.2) ; 28°C	Frost-Tauwechsel-Beanspruchung (5.3); 10 Zyklen mit Luft mit konz. NaCl-Lösung (1 2)	Wärmebeanspruchung (5.4) ; 28°C	Kondenswasserwechselklima (5.5) ; 20 Zyklen ohne SO ₂	Freibewitterung (5.6)

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87

Anforderungen an die Bewertungskriterien
(in Klammern der betreffende Abschnitt)

Merkmale	Bewertungskriterium	Anforderung
Farbechtheit (4.1)	Lichtechtheitstyp	mindestens 6-7
Verschmutzungsanfälligkeit (4.2)	Anzeichen für Thermoplastizität	keine Anzeichen
Neigung zu Bewuchs (4.2)	Anzeichen für Bewuchs	keine Anzeichen
augenscheinliche Veränderungen (4.3)	Blasengrad u.a.	keine Veränderungen. (Treten Veränderungen auf, die die Funktionsfähigkeit nicht beeinflussen - z.B. Flecken, ist im Einzelfall zu entscheiden)
Abwitterung (4.4)	prozentuale Abnahme der mittleren Schichtdicke	höchstens 20 %
Untergrundhaftung (4.5)	Abreißfestigkeit	mindestens 1,5 N/mm ² (Einzelwerte) bzw. Bruch im Beton - untergrund
Feuchtigkeitshalt/ Schlagregendichtigkeit (4.6)	diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d (4.6.2) Wasseraufnahmekoeffizient w (4.6.1.) Produkt $s_d \cdot w$	$\leq 2m$ wenigstens im Feuchtbereich $\leq 0.5 \text{ kg /m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$ wenigstens im Feuchtbereich $\leq 0.2 \text{ kg / (m} \cdot \text{h}^{0.5})$ wenigstens im Feuchtbereich

Fortsetzung auf Anlage 5.3

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87

Anforderungen an die Bewertungskriterien (in Klammern der betreffende Abschnitt) - Fortsetz. von Anlage 5.2 -

Merkmale	Bewertungskriterium	Anforderungen
Durchlässigkeit gegenüber Schadgasen (4.7)	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d	$s_d(\text{CO}_2) \geq 50 \text{ m}$ (s. 4.7.1) $s_d(\text{O}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x)$: n. nicht festgel. (s.4.7. u.4.7.2)
Durchlässigkeit gegenüber Chloriden (4.8)	bezogene Chloridgehaltzunahme 0/8 mm 12mm/20mm	$\leq 0.1 \%$ nicht nachweisbar bzw. im Bereich der in unbeanspruchtem Beton üblichen Schwankungen
Dehnfähigkeit im Ribbereich (4.9)	Aussehen der Beschichtung im Ribbereich	äußerstenfalls Einschnürung und/oder Verfärbung (i.a. Aufh.)
Lieferqualität (4.10)	Farbabweichungen (4.10.1) Auslaufzeit (4.10.2) Dichte (4.10.3) nicht flüchtige Anteile (4.10.4) Glührückstand bzw. Pigmentanteil (4.10.4 o. 4.10.5) IR- Diagramm (4.10.5) Festkörpervolumen (4.10.6)	innerhalb im Einzelfall zu vereinbarenden Grenzen liegend $\pm 10 \%$ $\pm 2 \%$ $\pm 5 \%$ (relativ) $\pm 5 \%$ (relativ) aufgr. d. Erfahrung als bauprakt. ident. zu bezeichnen; Bindmitteltyp prinzipiell geeignet. $\pm 5 \%$ (relativ)

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87
 Anforderungen an die Bewertungskriterien
 (in Klammern der betreffende Abschnitt)

- Fortsetzung von Anlage 5.3 -

Merkmal	Bewertungskriterium	Anforderungen
Lagerfähigkeit (4.11)	augenscheinliche Veränderungen Auslaufzeit (4.10.2)	keine Veränderungen ± 15 % (Bei den im Zweifelsfall zusätzlich durchgeführten techno- logischen Unter- suchungen dürfen sich innerhalb sinnvoller Toleranzen keinerlei Verschlechterungen ergeben.)
Verarbeitbarkeit (4.12)	Blasengrad u.a. (s. 4.3) Abreißfestigkeit (s.4.5.) Aussehen der Be- schichtung im Rißbereich (s.4.9)	Bei dem vorauszusetzenden handwerklichen Können muß mit vertretbarem Arbeitsaufwand eine optisch einwandfreie Beschichtung hergestellt werden können. Ggf. ist der Temperaturbereich der Verarbeitbarkeit einzugrenzen. Zusätzlich technologische Untersuchungen nach Abschnitt 4.12 .

Zu Ergebnisbericht D2/95432

Merkmal: Farbechtheit(s. Abschnitt 4.1)Bewertungskriterium: Lichtechtheitstyp

Anforderungen: mindestens Lichtechtheitstyp 6-7

Bindemittel	Bewertung
Acrylatharz - farblos - pigmentiert (RAL 7032, grau) (FMPA-Nr. 064)	Lichtechtheitstyp 8 Lichtechtheitstyp 8
Vinylacetat- Ethylen- Mischpolymerisat - pigmentiert (weiß) (FMPA-Nr. 470 A)	Lichtechtheitstyp 6-7

Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87

Merkmal: Verschmutzungsanfälligkeit (s. Abschnitt 4.2)

Bewertungskriterium: Anzeichen für Thermoplastizität

Anforderungen: keine Anzeichen

Bindemittel	Bewertung
Vinylacetat- Ethylen- Mischpolymerisat - pigmentiert (weiß) (FMFA-Nr. 470 A)	geringe Anzeichen für Thermoplastizität

Ergebnis der durchgeführten Untersuchung

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87

Merkmal: augenscheinliche Veränderungen (s. Abschnitt 4.3)Bewertungskriterium: z.B. BlasengradAnforderungen: keine augenscheinlichen Veränderungen

Bindemittel	Beanspruchung	Bewertung
Vinylacetat- Ethylen- Misch- polymerisat -pigmentiert (weiß) (FMPA-Nr. 470 A)	Xenonbogenbestrahlung (5.1) über 1000 h	Oberfläche halbgläzend (zuvor seidenmatt)
	Normalklima DIN 50014 NK 23/502	keine Veränderungen
	Kondenswasser- konstantklima (5.2) über 20 d	keine Veränderungen
	Frost- Tauwechsel- beanspruchung (5.3) - mit Luft (3 Zykl.) - konz. NaCL- Lsg. (7 Zyklen)	Blasengrad < m1/g 5 (vereinelt aufgeplatzt) < m1/g 4
	Wärmebean- (5.4) spruchung	keine Veränderungen

Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen

Zu Ergebnisbericht D2/vom 31.08.87

Merkmal: augenscheinliche Veränderungen (s. Abschnitt 4.3)

Bewertungskriterium: z.B. Blasengrad

Anforderungen: keine augenscheinlichen Veränderungen

Bindemittel	Beanspruchung	
(FMPA-Nr. 064) Acrylatharz -pigmentiert (RAL 7032, grau)	Normalklima DIN 50014 NK 23/50-2	keine Veränderungen
	Kondenswasser- konstantklima (5.2) über 20 d	keine Veränderungen
	Frost- Tauwechsel- beanspruchung (5.3) -in Luft (20 Zyklen)	keine Veränderungen
	Wärmebe- (5.4) anspruchung	keine Veränderungen

Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87

Merkmal: augenscheinliche Veränderungen (s. Abschnitt 4.3)Bewertungskriterium: z.B. Blasengrad

Anforderungen: keine augenscheinlichen Veränderungen

Bindemittel	Beanspruchung	
	Normalklima DIN 50014 NK 23/50-2	keine Veränderungen
Vinylharz (FMPA-Nr. 890)	Kondenswasser- konstantklima (5.2) über 20 d	keine Veränderungen
	Frost- Tauwechsel- beanspruchung (5.3) - in Luft (20 Zyklen)	keine Veränderungen
	Wärmebe- (5.4) anspruchung	keine Veränderungen

Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87

Merkmal: Untergrundhaftung (s. Abschnitt 4.5)
 Bewertungskriterium: Abreißfestigkeit
 Anforderungen: mindestens 1N/mm^2 (Einzelwerte)

Bindemittel	Normalklima DIN 50014 NK23/ 50-2	Kondenswasser- konstantklima (5.2) 20 d	Frost- Tauwechsel beanspruchung (5.3)		Wärmebeanspruchung (5.4)
			in Luft	in konz. NaCl-Lösung	
Vinylacetat- 1) Ethylen- Mischpolymerisat (FMPA-Nr. 470 A)	$\bar{x} = 1.3 \text{ N/mm}^2$ min x = 1.2 N/mm^2 Trennfall: 100 % A	$\bar{x} = 1.3 \text{ N/mm}^2$ min x = 1.2 N/mm^2 Trennfall: 50 % A; 50 % A/B	nach 3 Zyklen $\bar{x} = 2.0 \text{ N/mm}^2$ min x = 1.9 N/mm^2 Trennfall: 100 % A	nach 7 Zyklen $\bar{x} = 1.1 \text{ N/mm}^2$ min x = 0.9 N/mm^2 Trennfall: 100 % A	$\bar{x} = 2.8 \text{ N/mm}^2$ min x = 2.6 N/mm^2 Trennfall: 100 % A
Acrylatharz 1) (FMPA-Nr. 472)	$\bar{x} = 2.5 \text{ N/mm}^2$ Trennfall: 100 % A	n.b. ²⁾	n.b.	n.b.	n.b.
Vinylacetat- Ethylen- 1) Mischpolymerisat mit gering. Weichmacheran- teil (FMPA-Nr. 404)	$\bar{x} = 2.3 \text{ N/mm}^2$ min x = 1.8 N/mm^2 Trennfall: 100 % A	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Acrylatharz 1) (FMPA-Nr. 064)	$\bar{x} = 3.0 \text{ N/mm}^2$ Trennfall: 100 % A	$\bar{x} = 2.4 \text{ N/mm}^2$ Trennfall: 100 % A	$\bar{x} = 3.1 \text{ N/mm}^2$ Trennfall: 100 % A	n.b.	$\bar{x} = 3.2 \text{ N/mm}^2$ Trennfall: 100 % A
Vinylharz 1) (FMPA-Nr. 890)	$\bar{x} = 2.6 \text{ N/mm}^2$ Trennfall: 100 % A	$\bar{x} = 3.2 \text{ N/mm}^2$ Trennfall: 100 % A	$\bar{x} = 2.6 \text{ N/mm}^2$ Trennfall: 100 % A	n.b.	$\bar{x} = 2.7 \text{ N/mm}^2$ Trennfall: 100 % A

1) auf abziehrauer Betonoberfläche

 \bar{x} : Mittelwert

min x: kleinster Einzelwert

Trennfälle: - A : im Beton

- A/B : zwischen Beton und Beschichtung

2) nicht bestimmt

Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87

Merkmal: Feuchtigkeitshaushalt (s. Abschnitt 4.6)

Bewertungskriterien: diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d
Wasseraufnahmekoeffizient w

Anforderungen: $s_d \leq 2m$

$$w \leq 0.5 \text{ kg / (m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$$

$$s_d \cdot w \leq 0.2 \text{ kg / (m} \cdot \text{h}^{0.5})$$

($\mu = s_d$ /Schichtdicke; vergl. Diffusionswiderstandszahl nach
DIN 52 615 Teil 1)

Bindemittel	w ¹⁾	Trockenbereich		Feuchtbereich	
		s _d ¹⁾	s _d ·w ¹⁾	s _d	s _d ·w
Vinylacetat- Ethylen- Mischpolymeri- sat (FMFA-Nr. 470 A)	0,050	3.8 $\mu=7.7 \cdot 10^3$	0.19	0.15 $\mu=0.33 \cdot 10^3$	0.0075
Acrylat- harz -farblos	n.b. ³⁾	n.b.	n.b.	0.79 $\mu=7.9 \cdot 10^3$	n.b.
-pigmentiert (FMFA-Nr. 472)	0.013/ 0.0048 ²⁾	n.b.	n.b.	1.66 $\mu=16.6 \cdot 10^3$	0.022
Vinylacetat- Ethylen-Misch- polym. m. ger. Weichmacherant. (FMFA-Nr. 404)	n.b.	1.72 $\mu=4.0 \cdot 10^3$	n.b.	1.00 $\mu=2.3 \cdot 10^3$	n.b.
Acylatharz pigmentiert (FMFA-Nr. 064)	n.b.	3.6 $\mu=18.3 \cdot 10^3$	n.b.	2.0 $\mu=10.0 \cdot 10^3$	n.b.
Vinylharz (FMFA-Nr. 890)	n.b.	5.8 $\mu=19.0 \cdot 10^3$	n.b.	4.0 $\mu=12.5 \cdot 10^3$	n.b.

1) Dimensionen wie unter "Anforderungen" angegeben (s.o.)

2) Der zweite Wert ergibt sich bei einer zusätzlichen Grun-
dierung mit einem Silan.

3) n.b. = nicht bestimmt

Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87

Merkmal: Diffusionswiderstand gegenüber Kohlendioxid
(s. Abschnitt 4.7.1)

Bewertungskriterium: diffusionsäquivalente Luftschicht-
dicke s_d

Anforderungen: $s_d \geq 50$ m($\mu = s_d$ / Schichtdicke; vergl. Diffusionswiderstandszahl nach DIN52615 T1)

Bindemittel	Schicht- dicke	Trocken- bereich	Feucht- bereich
Vinylacetat- Ethylen- Mischpolymeri- sat (FMPA-Nr. 470 A)	0.47 mm	$\mu = 1.1 \cdot 10^6$ $s_d = 500$ m	n.b. 1)
Acrylatharz - farblos - pigmentiert (FMPA-Nr. 472)	0.1mm	$\mu = 4.4 \cdot 10^6$ $s_d = 440$ m	n.b.
	0.1 mm	$\mu = 11.4 \cdot 10^6$ $s_d = 1140$ m	n.b.
Vinylacetat (FMPA-Nr. 432/1)	0.16 mm	$\mu = 1.7 \cdot 10^6$ $s_d = 270$ m	$\mu = 1.3 \cdot 10^6$ $s_d = 200$ m
gelöstes Acrylatharz (FMPA-Nr. 432/2)	0.15 mm	$\mu = 0.2 \cdot 10^6$ $s_d = 30$ m	$\mu = 0.6 \cdot 10^6$ $s_d = 90$ m
Acrylatharz pigmentiert (FMPA-Nr. 064)	0.17 mm	$\mu = 2.5 \cdot 10^6$ $s_d = 430$ m	n.b.

1) n.b. = nicht bestimmt

- Fortsetzung auf Anlage 7.6.2

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87

- Fortsetzung von Anlage 7.6.1 -

Bindemittel	Schicht- dicke	Trockenbe- reich	Feucht- bereich
Acrylat (FMFA-Nr. 432/3)	0.14 mm	$\mu = 0.21 \cdot 10^6$ $s_d = 29 \text{ m}$	$\mu = 0.13 \cdot 10^6$ $s_d = 18 \text{ m}$
lösemittelfreies Epoxidharz (FMFA-Nr. 432/4)	1.1 mm	$\mu = 1.6 \cdot 10^6$ $s_d = 1700 \text{ m}$	n.b. ¹⁾
lösemittelfreies Epoxidharz (FMFA-Nr. 432/5)	1.2 mm	$\mu = 1.1 \cdot 10^6$ $s_d = 1300 \text{ m}$	n.b.
Polyurethan (FMFA-Nr. 432/6)	0.44 mm	$\mu = 0.08 \cdot 10^6$ $s_d = 35 \text{ m}$	n.b.
Epoxidharz (FMFA-Nr. 432/8)	0.20 mm	$\mu = 20 \cdot 10^6$ $s_d = 4000 \text{ m}$	n.b.

1) n.b. = nicht bestimmt

Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87

Merkmal: Diffusionswiderstand gegenüber Sauerstoff

(s. Abschnitt 4.7.2)

Bewertungskriterium: diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d

Anforderungen: noch nicht festgelegt

($\mu = s_d$ /Schichtdicke; vergl. Diffusionswiderstandszahl nach DIN 52615 Teil 1)

Bindemittel	Schichtdicke	μ	s_d
lösemittelfreies Epoxidharz (FMFA-Nr. 95432/4)	1.1. mm	$35.5 \cdot 10^6$	39 000 m
lösemittelfreies Epoxidharz (FMFA-Nr. 95432/5)	1.2 mm	$33.0 \cdot 10^6$	40 000 m
Polyurethan (FMFA-Nr. 95432/6)	0.44	$2.10 \cdot 10^6$	920 m
Polyurethan (FMFA-Nr. 95432/7)	0.86	$10.4 \cdot 10^6$	8900 m

Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87

Merkmal: Durchlässigkeit gegenüber Chloriden

(s. Abschnitt 4.8)

Bewertungskriterium: auf unbeschichteten Beton bezogene
Chloridgehaltzunahme in zwei TiefenAnforderungen: Tiefe 0 ÷ 8 mm: bezogene Zunahme \leq 10 %Tiefe 12 ÷ 20 mm: nicht nachweisbar im Bereich
der Untersuchungsgenauigkeit

Hinweis : Die hier mitgeteilten Ergebnisse entsprechen einem Vorgehen, das nicht in allen Teilen mit der in Abschnitt 4.8 beschriebenen Methode übereinstimmt. Der Wert in Spalte 5 ist nach folgender Formel zu berechnen:

$$\text{Spalte 5} = (\text{Spalte 2} - \text{Spalte 4}) / (\text{Spalte 3} - \text{Spalte 4})$$

Bindemittel	Tiefe	Chloridgehalt in Masse - % (bezogen auf den Zementstein)			bezogene Zunahme
		beansprucht		unbe- anspr.	
		be- schich- tet	unbesch.	unbe- schich- tet	
	1	2	3	4	5
Vinylacetat- Ethylen- Mischpolymerisat	0 ÷ 8 mm	0.237	0.263	0.011	90 %
(FMPA-Nr. 470A)	12 ÷ 20 mm	0.011	0.141	0.011	Zunahme nicht nach- weisbar

Ergebnis der Untersuchungen

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87

Merkmale: Dehnfähigkeit im Ribbereich

(s. Abschnitt 4.9)

Bewertungskriterium: Aussehen der Beschichtung
im Ribbereich

Anforderungen: äußerstenfalls Einschnürung und
Verfärbung

Bindemittel	Untergrund	Herst. bed.	Beanspruch.	Prüfbed.	Prüferg.
Vinylacetat- Ethylen- Mischpolymeri- sat (FMPA-Nr. 470 A)	abziehrauher Beton	Normalklima DIN 50014- NK 23/50-2	Normalklima DIN 50014- NK 23/50-2	Normalklima DIN 50014- NK 23/50-2	0.2 mm überbrückt
			Kondenswasser- konstantklima (5.2) über 20 d		0.2 mm überbrückt
			Alterung (5.4)	Prüfkörper- temperatur = 0°C	bei 0.1 mm gerissen
<i>Ethylen- Mischpolymerisat</i> (FMPA-Nr.: 528)	abziehrauher Beton	Normalklima DIN 50014- NK 20/65-2	7 d 30°C 14d NK 20/65-2	Prüfkörper- temperatur = 0°C	0.2 mm überbrückt
Vinylacetat- Ethylen-Misch- polymerisat m. geringem Weichmacher- anteil (FMPA-Nr. 404)	abziehrauher Beton	Normalklima DIN 50014- NK 20/65-2	10d NK 20/65-2 7 d 30°C 7 d NK 20/ 65-2	Normalklima NK 20/65-2	0.2 mm überbrückt

Zu Ergebnisbericht D2/95432 vom 31.08.87

Merkmal: Verarbeitbarkeit (s. Abschn. 4.12)

Bewertungskriterium: - Applikation
 - Blasengrad u.a.
 - Abreißfestigkeit
 - Aussehen der Beschichtung im
 Rißbereich (s. Abschnitt 5.4)

Anforderungen: siehe Anlage 5.4

Bindemittel	Randbedingungen bei Verarbeitung und Lagerung	Prüfungsergebnis
Vinylacetat- Ethylen- Mischpolymerisat (FMPA-Nr. 470 A)	5° C	einfache Applika- tion; einwandfreie Oberfläche; 0.2 mm Rißbreite über- brückt bei Normal- klima DIN 50014- NK 23/50-2 1)
Acrylatharz (FMPA-Nr. 064)	0° C	einfache Appli- kation; einwandfreie Oberfläche 1)

1) andere Bewertungskriterien wurden nicht bestimmt.

Ergebnisse der Untersuchungen



FORSCHUNGS- UND
MATERIALPRÜFUNGSANSTALT
BADEN-WÜRTTEMBERG - OTTO-GRAF-INSTITUT -

FMPA

Bundesminister
für Raumordnung
Bauwesen und Städtebau

7000 STUTTGART 80 (VAIHINGEN)
Pfaffenwaldring 4
Fernsprecher (0714) 685-1
31.08.1987

5300 Bonn 2

Ihre Zeichen : B I 5 - 80 01 77 - 34

2085

Unsere Zeichen : D2/95 432

Betrifft : Forschungsvorhaben

Entwicklung von Prüfverfahren für Oberflächen-
behandlung von Stahlbeton zur Sanierung und
Verhinderung von Korrosionsschäden

hier : Kurzfassung des Ergebnisberichtes

Einleitung

Die Oberflächenbehandlung eines der Witterung ausgesetzten Stahlbetons im Rahmen einer Sanierung - insbesondere eine Endbeschichtung - soll üblicherweise neben dem optischen Erscheinungsbild vor allem die Diffusionseigenschaften des betreffenden Bauteiles so beeinflussen, daß sowohl ein günstiges bauphysikalisches Verhalten hinsichtlich des Feuchtigkeitshaushaltes als auch ein Korrosionsschutz für die Bewehrung in Form einer Sperrwirkung gegen Atmosphärien erzielt wird. Dieser Problembereich spielt insbesondere im Bereich von Fassaden einschließlich Sockeln sowie von nichtbefahrenen Verkehrsflächen eine wichtige Rolle.

1. Schäden an Stahlbeton und ihre Sanierung

Stahlbeton ist ein Verbundbaustoff aus Beton und Stahl, in dem sich die Druckfestigkeit des Betons und die Zugfestigkeit des Stahls günstig ergänzen. Neben der Übertragung von Spannungen hat der Beton bei unbeschichtetem Stahlbeton aber auch den Korrosionsschutz für die Bewehrung zu übernehmen, soweit diese nicht selbst durch geeignete Maßnahmen (z.B. Schutzüberzug) gegen Korrosion geschützt ist. An Schadstellen jedoch - infolge Planungs- und/oder Ausführungsfehlern entstanden - ist das günstige Zusammenwirken von Beton und Stahl bezüglich Tragverhalten und Korrosionsschutz gestört. Leicht zu erkennende Anzeichen für derartige Schadstellen sind zunächst spezifische Rißbilder sowie eine unregelmäßige Grautönung größerer, ungegliederter Betonflächen - insbesondere nach Durchfeuchtung infolge Regen. Unter Umständen zeichnen sich dabei sogar die einzelnen Stäbe der Bewehrung ab. Wird keine vorbeugende Sanierung durchgeführt, entstehen dann Rostspuren an den Stellen, die eine besonders geringe Betonüberdeckung der Bewehrung aufweisen. Da die Korrosionsprodukte ein größeres Volumen einnehmen als die ursprünglich metallischen Bewehrungsstäbe, treten schließlich Abplatzungen des Betons auf, so daß die Bewehrung völlig freiliegt. Im allgemeinen ist spätestens zu diesem Zeitpunkt ein Tragfähigkeitsverlust rechnerisch nachweisbar.

Die Sanierung von Schadstellen ist normalerweise unter einer oder mehreren der folgenden Rubriken einzuordnen:

- Vorbeugen gegen Einwirkung - ggf. aggressiver Atmosphärien;
- Herstellen des ursprünglichen bzw. geplanten Erscheinungsbildes und/oder bauphysikalischen Verhaltens hinsichtlich des Feuchtigkeitshaushaltes;
- Herstellen der ursprünglichen bzw. geplanten Tragfähigkeit.

Entsprechend den unterschiedlichen Anwendungsgebieten, die nicht selten alle zugleich abgedeckt werden müssen, bestehen die heute auf dem Markt befindlichen Betonsanierungssysteme i.a. aus verschiedenen Materialien (s. Anlage 1). Die Oberflächenbehandlung in Form einer Endbeschichtung soll hierbei gewährleisten, daß sanierte Bereiche in der Bausubstanz optisch unauffällig sind. Zusätzlich kann sie bei entsprechender Konzeption den Feuchtigkeitshaushalt günstig beeinflussen und feine Risse überbrücken, die z.B. in der Zugzone von Stahlbetonbauteilen häufig auftreten. Sofern nicht bereits der die Bewehrung überdeckende Beton bzw. Reparaturmörtel in ausreichendem Maße vor Korrosion schützt, muß die Endbeschichtung auch die korrosiven Medien abhalten können.

2. Chemische und elektrochemische Reaktionen

Um Anforderungen an eine Endbeschichtung hinsichtlich ihres Beitrages zum Korrosionsschutz festlegen zu können, ist der Korrosionsvorgang genauer zu betrachten. Die hier besprochenen Reaktionen laufen vornehmlich im schadhafte Stahlbeton ab, der infolge ungeeigneter Zusammensetzung, schlechter Verdichtung und/oder Rißbildung einem Eindringen der Atmosphärien nur geringen Widerstand bieten kann.

2.1 Korrosion des Bewehrungsstahles

Nach heutigem Wissensstand kann eine Stahlkorrosion nur unter folgenden Voraussetzungen auftreten:

- 1) Das elementare Eisen muß in Ionen überführt werden, was ausschließlich in der Anwesenheit von Wasser erfolgt.
- 2) Eine Elektronenabgabe des Eisenelementes muß erfolgen (Oxidation). Diese Oxidation kann durch Sauerstoff oder durch Säuren erfolgen. So kann grob zwischen der sogenannten Sauerstoffkorrosion und der Säurekorrosion unterschieden werden. Die Säurekorrosion tritt im wesentlichen bis zu einem pH-Wert von höchstens 9 auf.
- 3) Als korrosionsauslösende Substanzen haben sich des weiteren Chloride, Nitrate und Sulfate erwiesen. Diese Salze können selbst in geringen Konzentrationen (z.B. 500 mg Chloride in 1 Liter Porenwasser gelöst) in alkalischem Milieu Korrosion verursachen.

Wenn man die o.g. Faktoren berücksichtigt, so ergibt sich daraus, daß zur Unterbindung von Korrosion die Anwesenheit von Wasser, Sauerstoff und korrosionsfördernden Salzen am Bewehrungsstahl vermieden werden müßte. Zusätzlich sollte ein möglichst hoher pH-Wert (pH-Wert 12 bis 13) erzielt

werden. Eine Absenkung des pH-Wertes auf pH=11 bei gleichzeitiger Anwesenheit von Chloriden oder Sulfaten in einer Konzentration von ca. 100 mg/l hätte eine deutliche Korrosion des Bewehrungsstahls zur Folge.

2.2 Korrosionsschutzwirkung des Zementsteins

Aufgrund seiner Zusammensetzung kann Zementstein sowohl ohne Reaktion als auch nach Reaktion mit Kohlendioxid einen wirksamen Schutz gegen die Korrosion der Bewehrung darstellen, sofern die Porenflüssigkeiten durch Lösung der dabei gebildeten Alkalihydroxide und -carbonate einen pH-Wert von über 11 aufweisen. Selbst ein carbonatisierter Zementstein bietet somit einen gewissen Korrosionsschutz. Beim Zutritt von Stickoxiden (NO, NO₂) und Schwefeldioxid (SO₂) in Verbindung mit Sauerstoff entstehen jedoch korrosionsfördernde Nitrate bzw. Sulfate. Insbesondere die Alkalinitrate können bereits in geringer Konzentration eine Stahlkorrosion hervorrufen, auch wenn die Porenflüssigkeit infolge Lösung von Alkalicarbonaten und -hydroxiden alkalisch reagiert.

3. Anforderungsprofil an Beschichtungen

Nach Applikation der Endbeschichtung dürfen sich sanierte Bereiche weder im Farbton noch in der Oberflächenstrukturierung von den übrigen - im Regelfalle ebenfalls mit der Endbeschichtung versehenen - Flächen abheben. Es dürfen keine auffälligen Veränderungen auftreten wie deutliche lokale oder allgemeine Farbtonänderungen bzw. Verschmutzungen, Blasen, Risse oder Runzeln. Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit der Beschichtung sind Abwitterungen nur in begrenztem Umfang zulässig. Die Haftung muß in der Größenordnung der Abreißfestigkeit des Untergrundes liegen.

Bei den hier betrachteten chemischen Prozessen spielt das Wasser eine wesentliche Rolle. Durch eine Austrocknung des Betons kann daher die Korrosionsgeschwindigkeit der Bewehrung vermindert werden. Auch im Hinblick auf die Frostbeständigkeit des Betons und die Vermeidung von Schäden durch Treiben alkaliempfindlicher Zuschläge ist ein ausreichend trockener Beton anzustreben. Um eine Austrocknung zu erleichtern, sollte der Dampfdiffusionswiderstand der Beschichtung klein sein. Gleichzeitig sollte möglichst wenig neue Feuchtigkeit von außen - z.B. bei Schlagregen - eindringen. Diese beiden

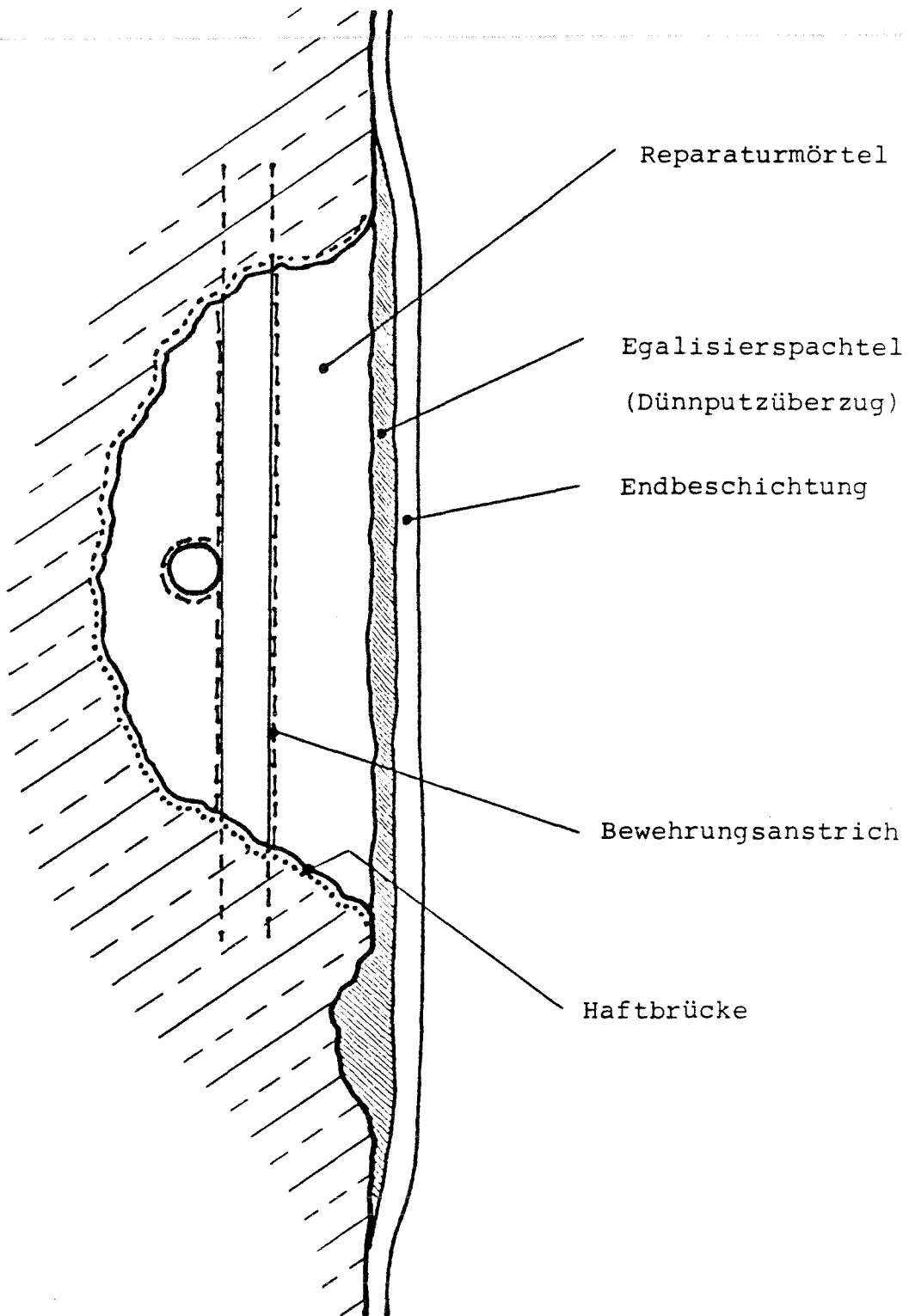
gegensätzlichen Forderungen sind so aufeinander abzustimmen, daß auf Dauer die Ausgleichfeuchte einen vertretbaren Grenzwert nicht überschreitet und dennoch ein hoher Diffusionswiderstand gegenüber den Gasen O_2 , CO_2 und NO_x erreicht wird. Außerdem sollte im Hinblick auf die Anwendung im Sockelbereich und bei nichtbefahrenen Verkehrsflächen eine Sperrwirkung gegen Chloride (Tausalz) gewährleistet sein. Der Einfluß von Rissen auf die zu regulierenden Diffusionsvorgänge kann kaum abgeschätzt werden. Daher ist zu fordern, daß ein Beschichtungsfilm die Risse im Untergrund bis zu einer praxisnahen Breite überbrückt, ohne selbst zu reißen.

In den Anlagen 2 und 3 sind die wesentlichen Anforderungen tabellarisch zusammengestellt. Diese müssen von der Beschichtung unter den im Praxisfall auftretenden Randbedingungen erfüllt werden. Insbesondere sind hierbei hohe sowie stark veränderliche Temperaturen und Feuchtigkeiten (auch des Untergundes!) zu berücksichtigen.

4. Ergebnisse und Zielvorstellungen

Zu den einzelnen Merkmalen des Anforderungsprofils werden entsprechende Prüfverfahren angegeben. Besonders zu erwähnen sind hierbei die Verfahren zur Ermittlung der Kohlendioxiddiffusion im Feuchtbereich und der Sauerstoffdiffusion. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden außerdem verschiedene im Handel angebotene Beschichtungen hinsichtlich einzelner Merkmale untersucht. Die Ergebnisse reichen jedoch nicht für eine abschließende Beurteilung bestimmter Materialien im Hinblick auf ihre Eignung für die Beschichtung von Stahlbeton aus. In einer Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Untersuchungen an Stahlbetonbauwerken, die seit unterschiedlich langer Zeit beschichtet sind, und der Laborprüfergebnisse der entsprechenden Betonsanierungsmaterialien sollte nun abgeklärt werden, inwieweit die hier vorgeschlagenen Prüfverfahren das tatsächlich vorhandene Anforderungsprofil abdecken und somit für die zuverlässige Beurteilung einer Beschichtung im Labor ausreichen. Durch die vergleichende Analyse der Ergebnisse aus solchen Untersuchungen können dann voraussichtlich auch material-, insbesondere bindemittelspezifische Schwächen und Stärken der einzelnen Beschichtungen herausgefiltert werden. Derartige Informationen können zusammen mit der Angabe besonders schwer zu erfüllender Anforderungen eine wertvolle Hilfe für die Praxis bei der grundsätzlichen Formulierung von Beschichtungen sowie beim Festlegen von Testreihen im Rahmen der weiteren Entwicklung sein.

Zu Kurzfassung D2/95 432 vom 31.08.1987



Prinzipieller Aufbau einer sanierten Stahlbeton-Schadstelle
(nicht maßstäblich!)

Zu Kurzfassung D2/95 432 vom 31.08.1987

Anforderungen an die Bewertungskriterien (Teil 1)

Merkmale	Bewertungskriterium	Anforderung
Farbechtheit	Lichtechtheitstyp	mindestens 6-7
Verschmutzungsanfälligkeit	Anzeichen für Thermoplastizität	keine Anzeichen
Neigung zu Bewuchs	Anzeichen für Bewuchs	keine Anzeichen
augenscheinliche Veränderungen	Blasengrad u.a.	keine Veränderungen (Treten Veränderungen auf, die die Funktionsfähigkeit nicht beeinflussen - z.B. Flecken, ist im Einzelfall zu entscheiden)
Abwitterung	prozentuale Abnahme der mittleren Schichtdicke	höchstens 20 %
Untergrundhaftung	Abreißfestigkeit	mindestens 1,5 N/mm ² (Einzelwerte) bzw. Bruch im Beton - untergrund
Feuchtigkeitshalt/ Schlagregendichtigkeit	diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d	$\leq 2m$ wenigstens im Feuchtbereich
	Wasseraufnahmekoeffizient w	$\leq 0.5 \text{ kg /m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$ wenigstens im Feuchtbereich
	Produkt $s_d \cdot w$	$\leq 0.2 \text{ kg / (m} \cdot \text{h}^{0.5})$ wenigstens im Feuchtbereich

Zu Kurzfassung D2/95 432 vom 31.08.1987

Anforderungen an die Bewertungskriterien (Teil 2)

Merkmal	Bewertungskriterium	Anforderungen
Durchlässigkeit gegenüber Schadgasen	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d	$s_d(\text{CO}_2) \geq 50 \text{ m}$ $s_d(\text{O}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x)$: n. nicht festgel.
Durchlässigkeit gegenüber Chloriden	bezogene Chloridgehaltzunahme 0/8 mm 12mm/20mm	$\leq 0.1 \%$ nicht nachweisbar bzw. im Bereich der in unbeanspruchtem Beton üblichen Schwankungen
Dehnfähigkeit im Ribbereich	Aussehen der Beschichtung im Ribbereich	äußerstenfalls Einschnürung und/oder Verfärbung (i.a. Aufh.)
Lieferqualität	Farbabweichungen Auslaufzeit Dichte nicht flüchtige Anteile Glührückstand bzw. Pigmentanteil IR- Diagramm Festkörpervolumen	innerhalb im Einzelfall zu vereinbarenden Grenzen liegend $\pm 10 \%$ $\pm 2 \%$ $\pm 5 \%$ (relativ) $\pm 5 \%$ (relativ) aufgr. d. Erfahrung als bauprakt. ident. zu bezeichnen; Bindmitteltyp prinzipiell geeignet. $\pm 5 \%$ (relativ)



Bundesminister
für Raumordnung
Bauwesen und Städtebau

7000 STUTTGART 80 (VAIHINGEN)
Pfaffenwaldring 4
Fernsprecher (0714) 685-1

31.08.1987

5300 Bonn 2

Ihr Zeichen: B I 5 - 80 01 77 - 34

12085

Unser Zeichen: D2/95 432

Betrifft: Forschungsvorhaben

Entwicklung von Prüfverfahren für Oberflächenbe-
handlung von Stahlbeton zur Sanierung und Ver-
hinderung von Korrosionsschäden

hier: englische Kurzfassung des Ergebnisberichtes

Development of testing methods for the surface treatment
of reinforced concrete in order to repair and prevent
damages by corrosion

Introduction

The surface treatment, within a repair programm, of a reinforced concrete exposed to weather conditions - especially a final coating - normally shall influence, besides the visual aspect, the diffusion qualities of the member in such a way that the result is a favorable physical behaviour in view of the humidity equilibrium as well as a protection against corrosion of the reinforcement in form of an obstructive effect against atmospheric influences. These problems play an important role in the field of facades with their bases as well as areas under traffic exposure.

1. Damages upon reinforced concrete and their repair

Reinforced concrete is a composite material out of concrete and steel in which the compressive strength of concrete and the tensile strength of steel compensate each other. Besides the transmission of stresses, concrete has to take over for uncoated reinforced concrete the protection against corrosion of the reinforcement if it is not protected itself against corrosion by appropriate measures (for instance protective coating). At the damaged areas - caused by errors in planning and/or in execution - the favorable cooperation of concrete and steel in the field of bearing capacity and protection against corrosion is disturbed. Easy discernible symptoms for such damages are specific crack patterns as well as an irregular grey colour of bigger, integral concrete surfaces - especially after wetting by rain. Under certain circumstances different bars of the reinforcement even become visible. If no preventive repair is done, rust traces appear at areas with an especially thin concrete cover upon the reinforcement. As the corrosion products have a bigger volume than the originally metallic reinforcing bars, concrete is scaling off so that the reinforcing bars are completely uncovered. Generally at the latest at this moment a loss of the bearing capacity can be calculated.

The repair of such damages normally is done under one or various of the following aspects :

- prevention against the influence of aggressive atmospheric influences
- reconstruction of the original or planned aspect and/or the physical behaviour in view of the humidity equilibrium
- reconstruction of the original or planned bearing capacity

According to the different fields of application, which in most cases have to be achieved all together, the concrete repair systems available on the market consist of different materials (see annex 1). The surface treatment in form of a final coating shall guaranty that, from the visual effect, the repaired areas cannot be noticed in the whole structure. Additionally, on condition of an appropriate design, it can favorably influence the humidity equilibrium and bridge fine cracks which, for instance, frequently appear in the tensile area of reinforced concrete members. If the concrete covering the reinforcing bar or the repairing mortar do not sufficiently protect against corrosion, the final coating has to keep off even the corrosive media.

2. Chemical and electrochemical reactions

In order to be able to determine the requirements to a final coating in view of its contribution to the protection against corrosion, it is necessary to consider the corrosion procedure more closely. The reactions quoted especially occur in a damaged reinforced concrete which, due to an unsuitable mix proportion, worse condensation and/or formation of cracks cannot resist against the penetration of atmospheric agencies.

2.1 Corrosion of the reinforcing bars

According to the actual state of knowledges a corrosion of steel can only appear under the following conditions :

- 1) The elementary iron has to be transferred into ions which can only happen in the presence of water.
- 2) The iron element has to liberate electrons (oxydation). This oxydation may happen by oxygen or acids. Thus, one can roughly distinguish between the so-called oxygen corrosion and the acid corrosion. The acid corrosion appears up to a pH-value of at most 9.
- 3) Furthermore chlorides, nitrates and sulphates have proved to be corrosion-promoting agents. These salts, even in low concentration (for instance 500 mg chlorides in 1 l pore water) cause a corrosion in an alkaline environment.

Taking into account the above factors it can be concluded that in order to prevent corrosion it is necessary to avoid the presence of water, oxygen and corrosion-promoting salts upon the reinforcing bar. In addition it is necessary to reach the highest pH-value possible (pH-value 12 to 13). A reduction of the pH-value to pH = 11 with a simultaneous presence of chlorides or sulphates in a concentration of about 100 mg/l inevitably leads to a clear corrosion of the reinforcing bar.

2.2 Protective action of the cement stone against corrosion

On behalf of its composition the cement stone is able to constitute without reaction as well as after reaction with carbon dioxide an effective protection against corrosion of the reinforcement, if the pore fluids reach by dissolution of the alkali-hydroxides and -carbonates a pH-value of more than 11. Thus, even a carbonated cement stone offers a certain protection against corrosion. By the entering of nitric oxides (NO, NO₂) and sulphur dioxide (SO₂) in connection with oxygen corrosion-promoting nitrates or sulphates appear. Especially the alkali-nitrates may cause, even in very small concentrations, a corrosion of steel even if the pore fluid reacts in an alkaline way due to the solution of alkali-carbonates and -hydroxides.

3. Requirements to the coating

After the application of the final coating repaired areas shall not differ neither in colour nor in the surface structure from the other surfaces - normally covered with the final coating, too -. No striking changes such as clear local or general changes of colour or pollutions, bubbles, cracks or wrinkles shall appear. As far as the durability of the coating is concerned weathering influences are only admitted until a certain degree. The adhesion must reach the size of the adhesive strength of the underground.

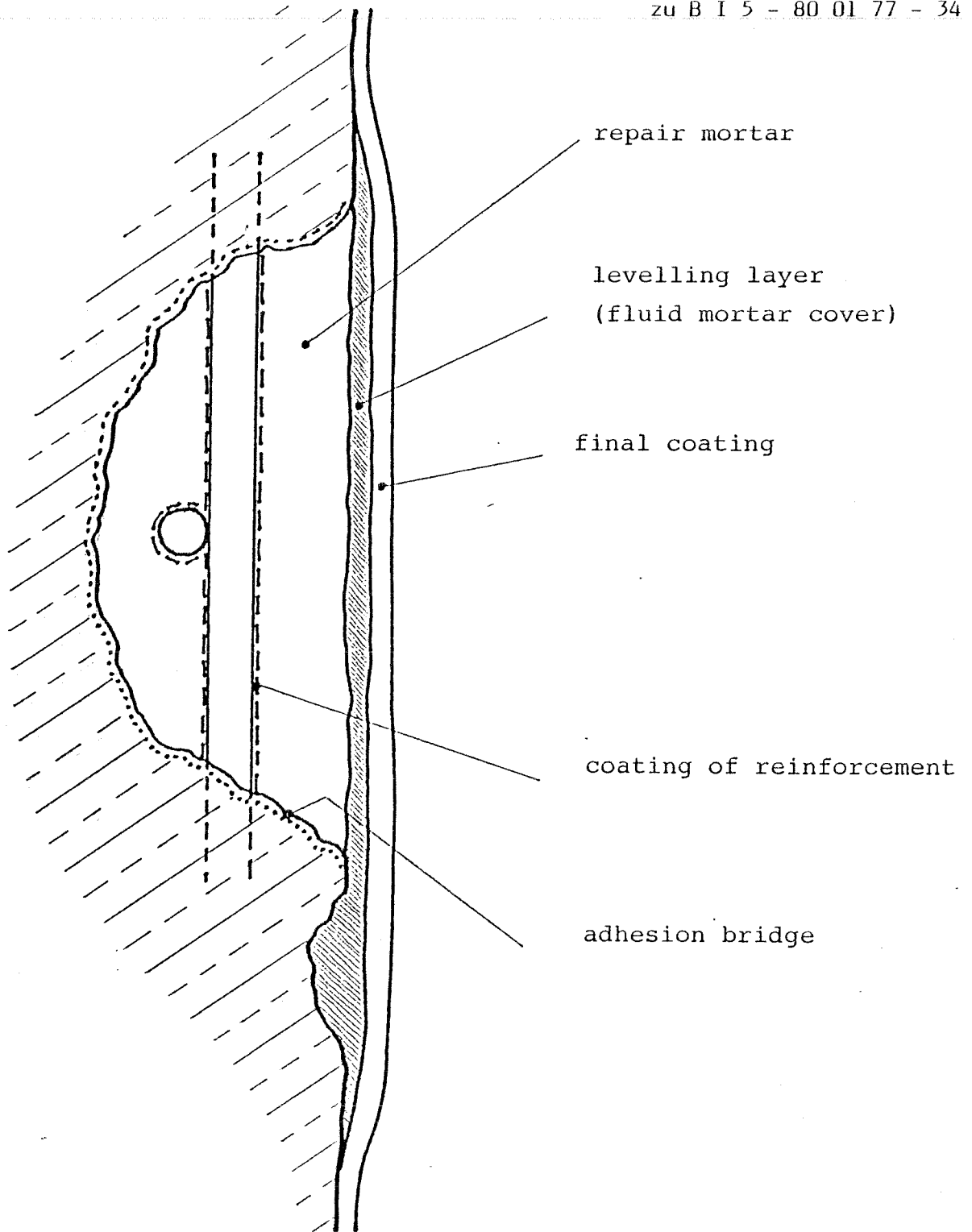
For the chemical process considered water plays an essential role. Therefore the corrosion velocity of the reinforcement can be reduced by a drying of concrete. Even as far as the resistance against frost of concrete and the prevention of damages by the expanding of aggregates sensible to alkali is concerned, the aim must be a sufficiently dry

concrete. In order to facilitate drying the resistance to diffusion by vapour of the coating should be low. In the meantime as less humidity as possible from outside - for instance rain - should penetrate. These two contrary requirements have to be coordinated in such a manner that in the long term the compensation humidity doesn't surpass a reasonable limit value and nevertheless reaches a high diffusion resistance against the gases O_2 , CO_2 , and NO_x . Furthermore, as far as the use in the base area or areas under traffic exposure are concerned there should be an obstructing effect against chlorides (thawing salt). The influence of the cracks upon the diffusion procedures to be regulated can hardly be estimated. Therefore it should be required that a coating film bridges the crack in the underground until a width common in practice without cracking itself.

The annexes 2 and 3 enumerate the most important requirements within a table. They have to be met by the coating under the marginal conditions of practice. In particular, high as well as very variable temperatures and humidities (even of the base) have to be taken into consideration.

4. Results and aims

In addition to the different characteristics of the requirements demanded testing proceedings are quoted. The methods for determining the carbon dioxide diffusion in the humid area and the oxygen diffusion have to be mentioned. Within this research programm different coatings available on market were investigated in view of their characteristics. The results are not satisfactory enough to give a conclusive judgement about certain materials in view of their qualification for the coating of reinforced concrete. Comparing the results of the investigations upon reinforced concrete members coated since a variably long time and the laboratory results upon the materials for repairing concrete members it had to be find out to what extent the proposed testing methods correspond to the existing requirements and, thus, are sufficient for a reliable judgement of a coating in the laboratory. By the comparing analysis of the results of such investigations it is possible to state the weakness and strength of the different coatings as far as the material and especially the binder is concerned. Such informations, together with the indication of requirements, which can hardly be fulfilled, are a good help for practice for the design of coatings as well as for the determination of further testing series in the future.



Structure of a repaired damaged area of a reinforced concrete member
(not in correct scale)

characteristics	valuation criteria	requirements
colour proof	proof against fading	at least 6 - 7
susceptibility to pollution	symptoms for thermoplasticity	no symptoms
tendency of vegetation	symptoms for vegetation	no symptoms
obvious changes	bubbles and others	no changes (if changes appear, which don't influence the serviceability - for instance stains, it has to be decided from case to case)
weathering	decrease of the mean layer thickness in percentage	at most 20 %
adhesion to the underground	adhesive resistance	at least $1,5 \text{ N/mm}^2$ (single values) or rupture in the concrete underground
humidity equilibrium/density against rain	thickness of atmospheric layer equivalent to diffusion s_d water absorption coefficient w product $s_d \cdot w$	$\leq 2 \text{ m}$ at least in the humid area $\leq 0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$ at least in the humid area $\leq 0,2 \text{ kg/(m} \cdot \text{h}^{0.5})$ at least in the humid area

characteristics	valuation criteria	requirements
permeability to harmful gases	thickness of atmospheric layer equivalent to diffusion s_d	$s_d(\text{CO}_2) \geq 50 \text{ m}$ $s_d(\text{O}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x)$ not stipulated
permeability to chlorides	relative increase of chloride content 0/8 mm 12 mm/20 mm	$\leq 0,1 \%$ not detectible or within the fluctuations usual for an unstressed concrete
capacity of elongation in the crack area	aspect of the coating in the crack area	at most shrinkage and/or change of colour
delivered quality	differences of colour time of run density non-volatile parts residue on ignition or portion of pigments IR-diagram volume of solid bodies	within limits which have to be determined from case to case $\pm 10 \%$ $\pm 2 \%$ $\pm 5 \%$ (relative) $\pm 5 \%$ (relative) based upon experiences identical for practice; type of binder is suitable $\pm 5 \%$ (relative)