

Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung

ISBN 3-88 314-547-5

August 1986

BAM Bundesanstalt
für Materialprüfung
Berlin

Forschungsbericht 126

**Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen
in Schwimmhallen**

von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel

ISBN 3-88 314-547-5

Forschungsbericht 126

Bundesanstalt für
Materialprüfung (BAM)
Berlin

Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen

von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel

August 1986

54 Seiten, 14 Abbildungen, 5 Tabellen

Forschungsauftrag

Beurteilung des Korrosionsverhaltens von Metallen und von Korrosionsschutzmaßnahmen in Hallenbädern

von W. Stichel

Auftraggeber: Institut für Bautechnik, Berlin
Gesch.Zeichen: IV 1-5-452/85

BAM-Aktenzeichen: 1.3/11467

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon (030) 8104-1 Telex 183 261 bamb d Telefax (030) 8 112 029

Copyright © 1986 by Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven 1
Telefon (0471) 46093-95

Kurzfassung

Aus Anlaß des Unglücks in einer Schweizer Schwimmhalle im Mai 1984 sollten die Korrosionsbeanspruchung im Schwimmhallenklima und seine Auswirkung auf tragende metallische Bauteile erörtert werden. Zunächst wird das Klima in Hallen beschrieben, deren Badewasser gechlort wird. Die geringen Gehalte an Chlor und Chlorverbindungen können zusammen mit Feuchtigkeitsfilmen auf Metalloberflächen kondensieren. Es entstehen saure, chloridreiche und oxidierende Elektrolyte mit unterschiedlicher Auswirkung auf die metallischen Werkstoffe.

Anschließend wird das Korrosionsverhalten der Werkstoffe unlegierter Stahl, verzinkter Stahl, Aluminium und nichtrostender Stahl unter Schwimmhallenbelastung charakterisiert. Die ersten drei erleiden vorwiegend gleichförmigen Flächenabtrag mit kalkulierbarer Abtragsrate. Lediglich Kondenswasser erhöht deren Angriff wesentlich. Nichtrostende Stähle können bei Korrosionsbeanspruchung durch unkalkulierbare Lochfraß- und Spannungsrißkorrosion zerstört werden. Letztere tritt nur bei den gebräuchlichen austenitischen Cr/Ni-Stählen auf, wegen des sauren, chloridreichen Oberflächenmilieus aber schon bei Raumtemperatur.

Abschließend wird das Verhalten der metallischen Werkstoffe gegeneinander abgewogen. Es werden Korrosionsschutzmaßnahmen sowie korrosionsbeständigere, höher legierte Stähle und Nickelbasis-Legierungen als Beispiele für Alternativen zu den bisher geläufigen metallischen Werkstoffen vorgestellt.

Schwimmbadatmosphäre — Schwimmbadkorrosion — Schwimmbadwerkstoffe — Schwimmbad — Korrosion — Korrosionsschutz

Abstracts

Corrosion and Corrosion Control of Metals in Indoor Swimming Baths

On account of an accident which had happened in a swimming bath in Switzerland in May 1985 the corrosivity of the climate in a swimming bath and its effect on the structural metal components should be reviewed. First the conditions existing in a bath with chlorinated water are characterised. The small amounts of chlorine and chlorine compounds contained in the air may condense with the aqueous film on the metal surfaces thus producing an aggressive acid and oxydising film of electrolyte which may attack the metal structures in different ways.

Then the corrosion behaviour of mild steel, galvanised steel, aluminium and stainless steels in chlorinated air is discussed. The first three materials are mainly affected by uniform corrosion. Condensed water may, however, raise their corrosion rate rapidly. Stainless steels on the other hand may be deteriorated by localised corrosion, such as pitting or stress corrosion cracking (SCC). In acid, chloride-containing environments austenitic steels may already be destroyed by SCC at ambient temperature.

Finally the corrosion behaviour of the different metals is compared and control measures are reviewed as well as more resistant high-alloy steels and nickel-base alloys are presented as alternatives to the currently used alloys.

Inhaltsverzeichnis

Seite

1.	Einleitung	1
2.	Klima in Hallenbädern	2
3.	Korrosionsbeanspruchung von Metallen in Schwimmhallen	6
4.	Korrosionsverhalten von Metallen in Schwimmhallenluft	12
4.1	Unlegierter Baustahl	13
4.2	Unlegierter Baustahl, verzinkt	17
4.2.1	Verzinkungsverfahren	17
4.2.2	Korrosionsverhalten	20
4.3	Aluminiumwerkstoffe	23
4.4	Nichtrostender Stahl	26
4.4.1	Werkstoff	26
4.4.2	Korrosionsverhalten	27
4.4.2.1	Lochkorrosion	29
4.4.2.2	Spaltkorrosion	30
4.4.2.3	Spannungsrißkorrosion	31
5.	Vergleichende Betrachtung der Werkstoffe	35
5.1	Unlegierter Stahl und Aluminium	37
5.2	Höherlegierte Stähle und Legierungen	39
	Zusammenfassung	40
	Literatur	45
	Bildanhang	51

1. Einleitung

Der Einsturz der Unterdecke im Hallenbad Uster im Kanton Zürich in der Schweiz, am 9. Mai 1985, hat bei vielen einschlägig Verantwortlichen auch in der BR Deutschland Besorgnis erregt. Was war geschehen? Dieses im November 1972 eröffnete Hallenschwimmbad war mit einer Zwischendecke aus Stahlbeton ausgestattet. Die planungsgemäß 8 cm dicke Decke hing an Abhängern aus nichtrostendem Stahl der Werkstoff Nr. 1.4301¹⁾. Diese Abhänger aus 10 mm dicken Rundstangen waren in der Bewehrung der Unterzüge des Hallendaches und der Unterdecke verankert.

Obwohl die Zwischendecke durch Überdimensionierung, nachträglich aufgebrauchten Akustikputz und eine Holzverkleidung um ca. 30 % schwerer war als vorher geplant²⁾, ist die Decke nicht infolge mechanischer Überlastung der Aufhängung abgestürzt. Ursache für dieses Unglück war vielmehr ein Korrosionsangriff der Stahlstäbe namens Spannungsrißkorrosion (SpRK). Diese Schadensursache überrascht Fachleute deshalb, weil bisher davon ausgegangen werden konnte, daß SpRK an Chrom-Nickel-Stählen unter Chlorideinwirkung in annähernd neutralen wässrigen Korrosionsmedien unterhalb von ca. 50°C nicht auftritt³⁾. Eine ebensolche Korrosionsbelastung wäre unter den im Hallenbad Uster vorliegenden Betriebsbedingungen bei oberflächlicher Betrachtung aber zu erwarten gewesen. Durch den Zwischenraum strömte in diesem Hallenbad die Ab- und Umluft der Schwimmhalle. Im Hinblick auf die zu erwartende feuchtigkeits- und chlorbedingte Korrosivität dieser Luft war der Einsatz von Chrom-Nickel-Stahl als Abhängermaterial vorgeschrieben¹⁾.

Laut Zulassungsbescheid⁴⁾ des Instituts für Bautechnik (Z30.1-44) ist der Einsatz von nichtrostenden Stählen der austenitischen Chrom-Nickel-Güten in Schwimmhallen für tragende Bauteile nicht ausdrücklich ausgeschlossen. Im Sinne einer Heraushebung der guten Korrosionsbeständigkeit der zugelassenen Stähle mit den Werkstoff Nr. 1.4301, 1.4541, 1.4401 und 1.4571 wird unter 5.6 darauf hingewiesen, "daß die Stähle (sogar) im Freien - auch bei Industrielatmosphäre und in Meeresnähe - ohne zusätzlichen Korrosionsschutz eingesetzt werden können, sofern nicht noch weitere Beanspruchungen auftreten. Vor dem Einsatz eines Stahles unter anderen klimatischen Bedingungen (z.B. in der chemischen Industrie) ist jedoch anhand der Datensammlung der Stahlhersteller oder der DECHEMA-Werkstofftabellen⁵⁾ zu prüfen, ob der Stahl bei den am

Einsatzort herrschenden atmosphärischen Angriffsmitteln erfahrungsgemäß geeignet ist." Soweit der Auszug aus dem Zulassungsbescheid.

Der dem Bauingenieur bisher zur Verfügung stehende Kenntnisstand über das Korrosionsverhalten nichtrostender Stähle hätte mit Recht keinem planenden Ingenieur oder Architekten Anlaß gegeben, in die Einschränkung im Zulassungsbescheid außer der chemischen Industrie auch das Schwimmhallenklima einzubeziehen. Kann er sich doch bei fast jedem Schwimmbadbesuch von dem recht guten Korrosionszustand nichtrostender Stahlteile im Sichtbereich überzeugen. Chloridbelastung (Meeresnähe) wird im Zulassungsbescheid ja auch ausdrücklich für unschädlich gehalten.

Wegen der Widersprüche zwischen dem erwarteten und dem durch das Unglück nachgewiesenen möglichen Korrosionsverhalten nichtrostender Stähle, hat das Institut für Bautechnik die Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) beauftragt, den Gründen für das Versagen der Abhänger nachzugehen. Anhand der ermittelten Ursachen sollen Konsequenzen hinsichtlich der Anwendung nichtrostender Stähle bei vergleichbarer Korrosionsbelastung gezogen werden. Auf der Suche nach Alternativen sollen auch das Verhalten von unlegiertem Stahl, verzinktem unlegiertem Stahl und Aluminium diskutiert und Maßnahmen für den Korrosionsschutz erörtert werden. Alle diese Betrachtungen sollen im Zusammenhang mit dem Einsatz der Materialien als tragende Bauteile im Hallenbadbereich angestellt werden.

2. Klima in Hallenbädern

Schwimmbeckenwasser wird zum Zwecke der Desinfektion in Deutschland in aller Regel gechlort. Seit 1964⁶⁾ wird zur oxidierenden Aufbereitung des Beckenwassers vereinzelt auch Ozon eingesetzt. Wegen seiner Toxizität muß es aber vor Eintritt in das Becken über Aktivkohlefilter quantitativ aus dem Badewasser entfernt werden. Bei der Diskussion der Korrosionsbelastung in Hallenbädern kann Ozon daher unbeachtet bleiben. Der Stand der Technik für die Aufbereitung und Desinfektion von Schwimmbeckenwasser ist in der VDI-Richtlinie 2089⁶⁾ und in DIN 19 643⁷⁾ beschrieben.

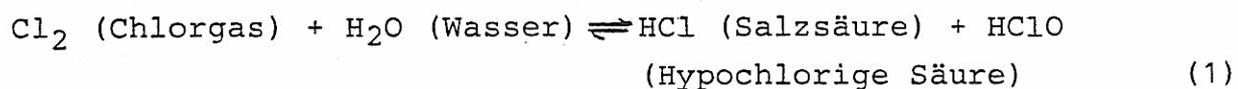
Zur Chlorung des Wassers in öffentlichen Schwimmbädern Deutschlands können heute folgende Verfahren eingesetzt werden⁷⁾:

- Chlorgasverfahren

- Natriumhypochlorit-Verfahren
- Chlorgas - Chlordioxid - Verfahren
- Calciumhypochlorit - Verfahren.

Von diesen wird wohl das Chlorgasverfahren am häufigsten angewendet. Auch die Halogene Brom und Jod haben desinfizierende Wirkung. Ihr Einsatz zur Badewasserdesinfektion ist in Deutschland jedoch nicht zugelassen.

Nach DIN 19 643 soll der pH-Wert des Beckenwassers zwischen 6,5 und 7,8 liegen. In diesem pH-Bereich liegt das zudosierte Chlor, unabhängig von seiner Ausgangsform, letztendlich als Sauerstoffsäure und als Salzsäure vor⁸⁾. Als Beispiel sei die Reaktion für das Lösen von Chlorgas in Wasser angeführt:



Letztere ist mit ihrer starken Oxidationskraft der desinfizierende Wirkstoff. Sie zerfällt im Wasser weiter nach der Reaktion:



Diese Zersetzung wird durch Wärme, Licht und bereits durch Spuren von Schwermetallionen, z.B. Ni^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} und Cu^{2+} , gefördert⁹⁾

Im Schwimmbadwasser reagiert die hypochlorige Säure mit allen oxidierbaren organischen Substanzen und Verbindungen. Sie wird also verbraucht. Um die desinfizierende Wirkung zu erhalten, soll der Gehalt an freiem, also an noch zur Verfügung stehendem Chlor nach DIN 19 643 mindestens 0,3 mg/l betragen, aber 0,5 - 0,6 nicht überschreiten⁷⁾. Im Ausland sind wesentlich höhere Gehalte zulässig oder gar vorgeschrieben. Diese geringen Chlorgehalte erhöhen das gegen eine Kalomelelektrode (3,5 m KCl) gemessene Redoxpotential des Badewassers auf Werte um 700 mV. Chlorfreies Wasser weist dagegen eine Redox-Spannung von ca. 200 mV auf¹⁰⁾. Das Redoxpotential ist ein Maß für das Oxidationsvermögen einer Lösung. Je höher sein Wert, desto stärker ist die Oxidationskraft. Im Badewasser ist dieser Meßwert ein Kriterium für das Desinfektionsvermögen des Wassers. Auf die Bedeutung dieses Wertes für Korrosionsvorgänge wird später noch eingegangen.

Aus dem überwiegend als HClO vorliegenden überschüssigen freien Chlor kann sich durch Umkehrung der Reaktion (1) über dem Schwimm-

becken stets auch wieder Chlorgas bilden. In sorgsam betreuten Schwimmhallen ist diese Chlorgaskonzentration aber sehr niedrig. Nach Messungen von H.J. Jessen und Mitarbeitern¹¹⁾ in vier Hallenbädern liegt die Chlorgaskonzentration im Atembereich der Schwimmer meist deutlich unter $0,05 \text{ mg/m}^3 \text{Cl}_2$, nur selten wenig über $0,1 \text{ mg/m}^3 \text{Cl}_2$. Auch 1,50 m über dem Wasserspiegel haben sich diese Werte nicht verändert. Eigene Messungen in zwei Berliner Schwimmhallen, durchgeführt mit Dräger-Prüfröhrchen Chlor 0,2/a, haben ebenfalls bestätigt, daß an keinem Meßpunkt ein Gehalt von $0,02 \text{ ppm Cl}_2 \hat{=} 0,06 \text{ mg/m}^3 \text{Cl}_2$ überschritten wurde. Zur Veranschaulichung dieser Konzentrationen sei darauf hingewiesen, daß der Jahresmittelwert für die Schwefeldioxidkonzentration in der Berliner Luft um $0,1 \text{ mg/m}^3 \text{SO}_2$ angesiedelt ist.

Wie von Bademeistern zu hören ist, werden die normgemäßen Werte für freies Chlor im Badewasser aber nicht selten überschritten. Auch der Gehalt der Schwimmbadluft an Chlorgas kann also höher liegen als oben angeführt. In der Regel liegt er aber unter der Geruchsschwelle für Chlor, die sich zwischen $0,06$ bis $3 \text{ mg/m}^3 \text{Cl}_2$ ($0,02 - 1 \text{ ppm}$) bewegt¹³⁾. Die Konzentrationsangabe 1 ppm bedeutet $1 \text{ cm}^3/\text{m}^3$. Der charakteristische Schwimmhallengeruch, im allgemeinen dem Chlorgehalt der Hallenluft zugeschrieben, wird demnach gar nicht durch Chlor verursacht. Eichelsdörfer und Mitarbeiter¹⁴⁾ machen hierfür vielmehr Chlorstickstoffverbindungen, sog. Chloramine verantwortlich. Sie entstehen bei der Reaktion der hypochlorigen Säure mit Ammoniak und anderen Stickstoffverbindungen im Harn, Schweiß sowie weiteren organischen Absonderungen des Badegastes. Außer Chlor sind in der Hallenluft also auch Chloramine enthalten. Sie sind ebenfalls Oxidationsmittel, ihre Oxidationskraft ist aber geringer als die der hypochlorigen Säure. Über ihre Konzentration in der Schwimmhallenluft liegen bisher keine Untersuchungsergebnisse vor.

An einer stark bewegten Wasseroberfläche eines Schwimmbeckens entstehen selbstverständlich auch zahlreiche Wassertröpfchen. Sie werden mit der Hallenluft in Form von Aerosolen abtransportiert und enthalten die Inhaltsstoffe des Badewassers. Im vorliegenden Zusammenhang interessiert insbesondere deren Gehalt an Chloriden, also der Chloridionen. Das Chloridion (Cl^-) ist eine Erscheinungsform des Chlors, wie sie in Kochsalzlösungen (NaCl) vorliegt. Es ist zwar korrosionsstimulierend, hat aber im Gegensatz zu gelöstem

Chlorgas keine oxidierende Wirkung. Auch in der Salzsäure (HCl) liegt das Chlor in dieser Form vor.

Als Folge der Chlorung, aber auch durch Verdunstung, menschliche Ausscheidungen und Zusätze für die Wasseraufbereitung (z.B. HCl, FeCl₃) bedingt, kann der Chloridgehalt des Beckenwassers ansteigen, weil das Beckenwasser im Kreislauf geführt und aufbereitet wird. Nach DIN 19 643 sind täglich zwar 30 l Beckenwasser durch Füllwasser zu ersetzen, trotzdem sind Anreicherungen aller Wasserinhaltsstoffe nicht zu vermeiden. Besonders hoch ist der Chloridgehalt naturgemäß in Sole- und Meerwasserschwimmbädern. Während der Chloridgehalt im Wasser von Süßwasserschwimmbädern im Bereich von 0,1 g/l Cl⁻ liegt, erreicht er im Meerwasser etwa das zweihundertfache. Je höher der Chloridgehalt des Wassers ist, desto höher ist er auch in Wassertröpfchen über der Wasseroberfläche. Über den Chloridgehalt der Schwimmhallenluft sind aber ebenfalls keine Untersuchungen bekannt. Der Chloridgehalt der Hallenluft kann auch durch salzsäurehaltige Reinigungsmittel erhöht werden, wie sie in Schwimmhallen vereinzelt zur Beseitigung von Kalkflecken eingesetzt werden.

Selbstverständlich ist die Schwimmhallenluft feucht. Um den Aufenthalt für den Badegast erträglich zu machen, muß mittels geeigneter Lüftungs- oder Klimatisierungsmaßnahmen dafür gesorgt werden, daß die Schwülegrenze in Schwimmhallen möglichst nicht überschritten wird⁶⁾. Sie liegt bei einem Wassergehalt der Luft von $x = 14,3$ g/kg. Bei einer sich im Rahmen der Behaglichkeit¹⁶⁾ bewegendem Hallentemperatur von 28°C entspricht diesem Wert eine relative Luftfeuchte (rF) von 60 %. Eine Begrenzung der Luftfeuchte ist auch erforderlich, um Schwitzwasserbildung zu erschweren und um hierdurch bedingte Bauschäden zu vermindern.

In vielen moderneren Schwimmhallen wird die Luftfeuchte durch Austauschen eines Teiles der Umluft durch Frischluft geregelt. Eine zusätzliche Entfeuchtung der Hallenluft findet nur selten statt. Die Abluft aus der Halle wird meist mit Ventilatoren abgesaugt. Hierbei ist die Anordnung der Absaugkanäle sehr unterschiedlich. Sie kann seitlich oder über dem Schwimmbecken, unterhalb oder oberhalb von Unterdecken abgeführt werden. Wird sie oberhalb der Unterdecke abgesaugt, strömt sie vielfach an der Unterkonstruktion der Zwischendecke vorbei. Abhänger, Befesti-

gungs- und Verbindungselemente der Unterkonstruktion sind vielfach aus Metall gefertigt.

In der Schwimmbadpraxis ist zu erwarten, daß die besonders korrosionsrelevanten Luftfeuchtigkeiten häufig, oft auch nur lokal begrenzt, z.B. in Toträumen, überschritten werden. So wurden bei eigenen Messungen zwischen der Unterdecke und der eigentlichen Hallendecke eines Schwimmbades bei gleicher Temperatur von 22 - 23°C im Bereich der Luftzuführung ca. 25 %, in einem anderen Zwischendeckenbereich aber Werte zwischen 60 und 80 % für die relative Feuchte gefunden. Die Bilder 1 und 2 zeigen, daß die Meßwerte in Abhängigkeit vom Badebetrieb stark schwanken.

3. Korrosionsbeanspruchung von Metallen in Schwimmhallen

Korrosion bei den in Schwimmhallen vorliegenden Bedingungen ist ein elektrochemischer Prozeß. Sie kann nur stattfinden, wenn die Metalloberfläche feucht ist. Korrosionsschäden können aber nur dann entstehen, wenn die feuchte Oberfläche zusätzlich Stoffe enthält, die dieser zumindest eine geringe elektrolytische Leitfähigkeit verleihen. Diese Eigenschaften besitzen Salze oder Säuren, die schon in unserer Atmosphäre in ausreichender Konzentration enthalten sind. Sie scheiden sich mit der Feuchtigkeit auf der Metalloberfläche ab und sind in dieser in Form von elektrisch geladenen Teilchen, den Ionen, gelöst. Flüssigkeiten, deren elektrische Leitfähigkeit durch Ionen erreicht wird, nennt man Elektrolyte. Voraussetzung für einen Korrosionsangriff eines Metalles ist also die Anwesenheit zumindest eines dünnen Elektrolytfilmes.

Schwimmhallen sind Innenräume. Elektrolytfilme auf Metalloberflächen können hier außerhalb des Beckenwasser- oder Spritzwasserbereiches also nicht wie an Außenatmosphären durch Niederschläge entstehen. Sie können sich nur aus den Inhaltsstoffen der Hallenluft entwickeln.

Wie bereits erwähnt, enthält die Schwimmhallenluft Feuchtigkeit als Wasserdampf. Eine Möglichkeit der Entstehung von Elektrolytfilmen ist die Betauung durch Überschreiten des Sättigungswertes, d.h. der Aufnahmefähigkeit der Luft für Wasserdampf. Dieser Wert ist temperaturabhängig. Die Temperatur, bei der die Sättigungsgrenze erreicht ist, wird Taupunkt genannt. Für den oben erwähnten

Wassergehalt von 14,3 g/kg, dem bei 28°C eine relative Feuchtigkeit von 60 % entspricht, liegt der Taupunkt bei 19,5°C. Kühlt diese Luft also an Metalloberflächen ab, deren Temperaturen 8,5 K unter der Lufttemperatur liegen, bildet sich auf dem Bauteil Tau- oder Schweißwasser.

Es ist aber bekannt, daß Korrosion an Stahloberflächen bereits bei relativen Luftfeuchten einsetzt, die deutlich unter der Sättigungsgrenze von 100 % angesiedelt sind. Hierfür sind hauptsächlich Salze verantwortlich, die wasseranziehende (hygroskopische) Eigenschaften besitzen und den Taupunkt herabsetzen¹⁷⁾. In der Schwimmhalle sind das vorwiegend die verschiedenen Erscheinungsformen des Chlors, also das Chlorgas, Chloride, hypochlorige Säure u.a. Sie gelangen mit der Hallenluft, den in ihr enthaltenen Nebeltröpfchen (Aerosole) oder als Partikel an die Metalloberfläche. Selbstverständlich gelangen auch die mit der Frischluft zugeführten Atmosphärenteilchen, insbesondere das Schwefeldioxid, mit der Hallenluft an die Metallbauteile. Sie sorgen dafür, daß Elektrolytfilme schon bei relativen Luftfeuchten entstehen, die unterhalb des Sättigungswertes liegen. Die relative Feuchte, bei der korrosionsstimulierende Elektrolytfilme entstehen, wird kritische Feuchte genannt. Infolge der Kapillarkwirkung entstehender Korrosionsprodukte wird die kritische Feuchte weiter abgesenkt.

Die kritische Feuchtigkeit gibt den Wert an, unter dem auf der Metalloberfläche kein Korrosionsprozeß mehr stattfinden kann, weil der Elektrolytfilm durch Verdampfen abtrocknet. Er ist natürlich von den auf der Metalloberfläche oder in der Luft enthaltenen Verbindungen abhängig. Als Erfahrungswert für das Rosten von Eisen in der Atmosphäre gilt nach Barton¹⁷⁾ eine relative Feuchte von 80 % als kritisch. Andere Untersuchungen haben in Abhängigkeit von der Luftverunreinigung niedrigere Werte ermittelt. Im allgemeinen kann man bei Stahl und Nichteisenmetallen Korrosion unterbinden, wenn die relative Feuchte Werte von 60 - 70 %¹⁹⁾ nicht überschreitet. In stark verunreinigten Atmosphären gibt es keine kritische Feuchte¹⁹⁾. Bei höheren Lufttemperaturen, wie sie in Schwimmbädern oft angetroffen werden, erhöht sich die Gefahr der Bildung von Wasserfilmen. Bei gleicher relativer Feuchtigkeit ist der Wasserdampfgehalt warmer Luft höher als der kalter Luft. Bei höheren Temperaturen sind daher nach dem h, x-Diagramm von

Mollier wesentlich geringere Temperaturabsenkungen erforderlich, um in das Gebiet der kritischen Feuchte zu gelangen. Insofern sind manche Schwimmhallenklimate korrosionschemisch mit denen feuchtwarmer Tropengebiete vergleichbar. Je nach Belüftungstechnik, Belüftungsaufwand, Luftführung etc. ist auch die Wahrscheinlichkeit für das Entstehen korrosionsfähiger Bedingungen an Metalloberflächen sehr unterschiedlich. Wie die erwähnten Feuchtemessungen gezeigt haben, sind die Schwankungen innerhalb einer Halle schon sehr stark. Von Halle zu Halle werden sich bauartbedingte Unterschiede überlagern. So ist es leicht zu erklären, daß das gleiche Metall schon innerhalb einer Schwimmhalle, erst recht aber in verschiedenen Hallen sehr unterschiedliche Korrosionszustände aufweisen kann.

Auf Grund des Gehaltes der Hallenluft an Chlor- und Chlorverbindungen ist zu erwarten, daß diese sich mit dem Wasser auf den Metallbauteilen absetzen. Im Gegensatz zu den mit Schwimmbadwasser kontaktierenden Metallteilen ist sogar anzunehmen, daß diese Salze mit anderen Atmosphärien auf der Oberfläche von metallischen Konstruktionsteilen angereichert werden. Da sie nicht durch Niederschläge oder Schwimmbadwasser abgespült werden, verbleiben einmal abgeschiedene Salze dauerhaft auf den Oberflächen und bilden im Laufe der Zeit Elektrolytfilme mit hoher Salzkonzentration. Da Salze und besonders auch Chloride, z.B. Kochsalz (NaCl), den Korrosionsangriff von Metallen stimulieren, muß davon ausgegangen werden, daß Elektrolytfilme auf Metallteilen in Schwimmhallen sehr korrosiv sind.

Eigene Untersuchungen an Metallteilen aus Hallenunterkonstruktionen haben diese Erwartung bestätigt. Der in den Korrosionsprodukten oder auch in anderen Ablagerungen auf nichtmetallischen Teilen ermittelte Chloridgehalt schwankte erwartungsgemäß stark, war aber immer hoch. Die Spannweite der Meßwerte lag zwischen einigen Zehntel bis zu 20 Mass. % (Cl^-). Hohe Werte sind auch in Mineralfaser- und anderen Dämmatten gefunden worden, wie sie zur Schalldämmung als Auflagen auf Zwischendecken benutzt werden. In allen untersuchten Bädern wurde das Beckenwasser mit Chlorgas desinfiziert.

F. Theiler ¹⁸⁾ hat im Rahmen seiner Untersuchungen zum Schadensfall im Schwimmbad Uster (Schweiz) Chlorid-Analysen von Ab-

lagerungen in den Frisch- und Fortluftkanälen zahlreicher weiterer Schwimmhallen durchgeführt. Dabei hat er auch eine sehr starke Anreicherung dieses Anions in den Abluftkanälen nachweisen können. Die Größenordnung seiner Meßwerte entsprach der von der BAM in Zwischendecken ermittelten. Besonders hohe Gehalte waren in einem Soleschwimmbad zu finden. Die von der EMPA²⁾ auf den Ablhängern aus nichtrostendem Stahl röntgenographisch bestimmte Rostvariante Akaganéit(β -FeOOH) entsteht nur in Gegenwart größerer Anteile an Chlorid auf der Stahloberfläche²⁰⁾. Seine Gegenwart auf den Schadensteilen beweist ebenfalls, daß auch deren Oberflächen mit Salz verunreinigt waren. Hier erhebt sich natürlich die Frage nach der Herkunft der Chloride. Stammen sie aus dem Salzgehalt des Schwimmbadwassers, sind sie also über Aerosole als Partikel, oder als gasförmiges Chlor oder als andere Verbindungsformen des Chlors an die Metalloberfläche gelangt. Zu dieser Frage liegen bisher keinerlei Untersuchungsergebnisse vor. Der hohe Chloridgehalt in den Ablagerungen von Abluftkanälen eines Soleschwimmbades zeigt aber, daß ein beträchtlicher Teil des Chlorids in Form gelösten Salzes in Wassertröpfchen oder partikelförmig mit der Luft mitgerissen wird. Ähnliche Beobachtungen hat man an der Meeresküste gemacht, wo der Salzgehalt der Luft in unmittelbarer Küstennähe sehr viel höher liegt als in größerer Entfernung von der Küste. Eigene Analysen von Rost auf Stahlabhängern aus einem Zwischendeckenhohlraum, der nicht zwangsweise von der Hallenluft durchströmt wurde ergaben, daß von ca. 30 g/kg Cl^- im Rost nur etwa 1 % der Chloridionen an Natrium gebunden waren. Der weitaus größte Teil muß demnach aus dem Chlorgehalt der Luft an die Metalloberfläche gelangt sein. Woher das Chlorid stammt, hängt offensichtlich auch von den Belüftungsbedingungen am Metallteil ab.

Die Korrosionsbelastung einer mit Salz verunreinigten Metalloberfläche hängt aber auch von der Art des Salzes ab. Je hygroskopischer das Salz ist, desto niedriger ist die kritische relative Feuchte. Während Stahl in Gegenwart von NaCl erst bei Überschreiten von ca. 75 % rF rostet, beginnt die Korrosion in Gegenwart von MgCl_2 schon bei ca. 35 % rF, bei Anwesenheit von ZnCl_2 gar ab 10 % rF. Kalziumchloridablagerungen fördern die Korrosion ab ca. 35 % rF²¹⁾. Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand wird angenommen, daß die relative Feuchte über der gesättigten Lösung dieser Salze den Wert für die kritische Feuchte bestimmt.

Liegt der Wasserdampfpartialdruck der Luft, ein direktes Maß für ihren Wassergehalt, unter dem der gesättigten Salzlösung, trocknet diese aus. Liegt er darüber, nimmt das Salz Wasser aus der Luft auf. Es entsteht ein Elektrolytfilm, der mit steigendem Feuchteangebot dicker wird. Oberhalb der kritischen Feuchte nimmt also die Korrosionsgefahr mit steigender relativer Feuchte zu. In der folgenden Tabelle 1 sind eine Reihe von relativen Feuchten über gesättigten Salzlösungen bei 20°C zusammengestellt, welche für Schwimmhallen interessant sein könnten.

Tabelle 1: Relative Feuchte von Luft im Gleichgewicht mit gesättigten Salzlösungen²¹⁾

Salz	rF in % bei 20°C
FeSO ₄ ·7H ₂ O	92
(NH ₄) ₂ SO ₄	81
NaCl	76
FeCl ₂	56
NiCl ₂	54
MgCl ₂ ·6H ₂ O	34
CaCl ₂ ·6H ₂ O	32
ZnCl ₂ ·xH ₂ O	10

Wie aus SO₂ in der Luft Schwefelsäure (H₂SO₄) auf der Metalloberfläche entstehen kann, so kann sich aus dem Chlorgehalt von Schwimmhallenluft nach Reaktion (1) Salzsäure (HCl) auf der feuchten Oberfläche bilden. Sie reagiert mit den Metallen und erzeugt Metallchloride, die nach Tabelle 1 ebenfalls die kritische Feuchte erniedrigen (z.B. FeCl₂, NiCl₂).

In Süßwasserschwimmhallen ist überwiegend mit der Gegenwart von Kochsalz (NaCl) und evtl. kleiner Mengen an CaCl₂ als Salzverunreinigung zu rechnen. In Meerwasserschwimmbädern auch mit dem stark hygroskopischen Magnesiumchlorid, da Meerwasser neben etwa 2,5 % Kochsalz auch noch 0,3 % Magnesiumchlorid enthält.

In Schwimmhallen sind Metallteile demnach einem Klima ausgesetzt, das feuchtem Tropenklima in Küstennähe nahekommt. Während an der freien Atmosphäre ein Teil der Salze und andere lösliche Verbindungen regelmäßig durch Niederschläge abgespült werden, bleiben

Salze, die sich in der Schwimmhalle ablagern, dauerhaft auf der Metalloberfläche. Da ständig neues Salz angeboten wird und ein Wechselspiel von Betauung und Verdunstung stattfindet, reichern sich die Salze auf den Oberflächen an. Aber auch für das Schwimmbad wird im allgemeinen die Regel gelten, nach der Korrosionsprozesse mangels Elektrolytfilm unterhalb einer relativen Feuchte von ca. 60 % an Metallen keinen Korrosionsschaden ²²⁾ mehr verursachen.

Der Belastung metallischer Werkstoffe durch eingedickte Salzlösungen überlagert sich in Schwimmbädern wahrscheinlich eine zusätzliche Korrosionsbeanspruchung, die in maritimer Umgebung nicht zu erwarten ist. Wie oben bereits ausgeführt wurde, kann Schwimmhallenluft Chlor in Konzentrationen enthalten, die am untersten Bereich der Geruchsschwelle, also ca. 0,02 ppm liegen. Die Chlorkonzentration, die sich in Wasser einstellt, das mit chlorhaltiger Luft in Berührung steht, kann mit Hilfe einer Interpolationsformel abgeschätzt werden²³⁾. Sie lautet

$$C = H \cdot p + (K \cdot p)^{1/3} \quad (3)$$

Wenn p , der Chlorgaspartialdruck in atm eingesetzt wird, gibt c die Chlorkonzentration im Wasser in g (Cl_2)/100 g (H_2O) an. H und K sind zwei temperaturabhängige Konstanten. Für 20°C gilt:

$$H = 7,75 \cdot 10^{-3}$$

$$K = 2,44 \cdot 10^{-6}$$

Wird für eine Gaskonzentration von 0,02 ppm ein Gaspartialdruck des Chlors mit $2 \cdot 10^{-8}$ atm eingesetzt, ergibt sich für den Chlorgleichgewichtsgehalt im Wasser eine Konzentration von etwa 0,4 mg/l Cl_2 . Diese Konzentration entspricht in etwa dem Gehalt an Chlor im Schwimmbadwasser. Auch wenn das durch gelöstes Chlor im Elektrolytfilm neben Salzsäure entstehende starke Oxidationsmittel hypochlorige Säure in Gegenwart von Schwermetallspuren nach Reaktion (2) schnell zerfällt, so ist doch mit einer Erhöhung des Redoxpotentials, also der Oxidationskraft eines solchen Elektrolyten zu rechnen. Auf die hierdurch bedingte Erhöhung der Korrosionsgefahr für passive Metalle wird später noch ausführlicher eingegangen.

Auf Metallteilen in Schwimmhallen, die nicht ständig abgespült oder gereinigt werden, wird sich zusammenfassend bei ausreichend

hoher relativer Feuchte also ein Elektrolytfilm bilden, der oxidierende Eigenschaften besitzt und stark salzhaltig ist. Dickere Wasserfilme, wie sie für die Aktivität von Korrosionselementen (Lochfraß, Muldenkorrosion, Kontaktkorrosions) erforderlich sind, werden sich aber nur in der Nähe des Taupunktes bilden oder wenn dieser an kühleren Metalloberflächen unterschritten wird. Derartige Voraussetzungen können z.B. an Abhängern erfüllt sein, die an der Stahlbewehrung einer Hallendecke befestigt sind, die kühler ist als die Hallenluft.

Ergänzend sei noch darauf hingewiesen, daß Korrosionsprozesse am feuchten Metall natürlich nur ablaufen können, wenn gelöster Sauerstoff gegenwärtig ist. Um korrosionswirksam zu werden, muß der allgegenwärtige Luftsauerstoff zunächst im Elektrolytfilm gelöst werden. Erst dann steht er an der Metalloberfläche zur Verfügung. Sowohl die Löslichkeit wie auch der Transport des Sauerstoffs durch den dünnen Wasserfilm finden aber mit einer Geschwindigkeit statt, die immer für ein ausreichend hohes Angebot sorgt. Ist also Feuchtigkeit auf dem Metall vorhanden, ist auch ein Überangebot an gelöstem Sauerstoff vorrätig, das für die Aufrechterhaltung der Korrosionsreaktionen sorgt.

4. Korrosionsverhalten von Metallen in Schwimmhallenluft

Das Korrosionsverhalten von Metallen in Schwimmhallen ist primär eigentlich ein bauphysikalisches Problem. Wenn es gelänge, die Feuchtigkeit an den Konstruktionsteilen, besonders aber an den tragenden Metallteilen ausreichend niedrig zu halten, wäre die Korrosion nur ein ästhetisches, nicht aber ein bausicherheitstechnisches Problem. Untersuchungen in Schwimmhallen haben gezeigt, daß es ohne weiteres möglich ist, die relative Feuchtigkeit in Zwischendeckenhohlräumen unter 60 - 70 % zu senken und die Korrosionsgeschwindigkeit sogar des ungeschützten Stahles auf geringe und vernachlässigbare Werte zu reduzieren.

Wiederholt wurde beobachtet, daß die Korrosionsgefahr dort besonders hoch ist, wo die Zwischendeckenhohlräume als Abluftkanal dienen. Die an den Abhängern vorbeiströmende Luft transportiert ein vielfaches dessen an Wasserdampf und aggressiven Stoffen an die Metallteile, als in einer Zwischendecke mit ruhender Luftschicht durch Diffusion an die Metallteile gelangen könnte. Die

durch Luftströmung transportierte Wasserdampfmenge ist z.B. um viele Zehnerpotenzen größer als die durch Diffusion herangeführte.

Da in vielen vorhandenen Schwimmhallen ein bauphysikalischer Korrosionsschutz durch Senken der Luftfeuchte oder durch Vermeiden lokaler Taupunktunterschreitung nicht möglich ist, soll im folgenden das Korrosionsverhalten von Metallen unter dem Gesichtspunkt erörtert werden, daß ausreichend Feuchtigkeit für Korrosionsprozesse vorhanden ist.

Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß der Salzgehalt auf den Oberflächen metallischer Konstruktionsteile in der Schwimmhallenluft hoch ist. Diese Salze sind wasserlöslich. Sie erhöhen somit zunächst einmal die Leitfähigkeit des Elektrolytfilmes und erleichtern auf diese Weise den Ablauf der elektrochemischen Korrosionsprozesse. In der Schwimmhalle ist aber zusätzlich aufgrund des Chlorgehaltes der Hallenluft mit der Anwesenheit des Oxidationsmittels hypochlorige Säure und mit dem Endprodukt des im Elektrolytfilm gelösten Chlors, der Salzsäure zu rechnen.

Da Schwimmhallen mit Außenluft belüftet werden, können je nach SO_2 -Gehalt der Zuluft sowohl schwefelsaure als auch salzsaure Salze auf den Metalloberflächen entstehen. Bei den Werkstoffen Stahl, Zink und Aluminium ist das korrosionsrelevante Verhalten beider Säuren und ihrer Salze in der Hallenluft etwa vergleichbar. Sie stimulieren vor allem den Korrosionsprozeß und unterscheiden sich kaum hinsichtlich ihrer spezifischen Einflüsse auf Korrosionsarten wie z.B. Spannungsrißkorrosion (SpRK) oder Lochfraß. Nur der Werkstoff nichtrostender Stahl weist eine besondere Sensibilität gegenüber Chloriden auf, wohingegen Sulfate unschädlich sind. Auch die Erhöhung des Redoxpotentials im Elektrolytfilm durch gelöstes Chlor wird sich lediglich beim nichtrostenden Stahl in besonderer Weise negativ auswirken. Bei den anderen Werkstoffen wird sich dieser Einfluß lediglich durch eine geringe Erhöhung der Abtragsrate bemerkbar machen. Die Anwesenheit von Chloriden oder Spuren von gelöstem Chlor ist demnach nicht bei allen Metallen ein Signal für eine besonders ausgeprägte Korrosionsgefährdung.

4.1 Unlegierter Baustahl

Unlegierte Stähle werden sehr häufig auch für tragende Bauteile

in Schwimmhallen eingesetzt. Hier soll zunächst auf das Korrosionsverhalten des ungeschützten Stahles eingegangen werden.

Unter der beschriebenen Korrosionsbelastung durch einen salzhaltigen Elektrolytfilm ist unlegierter Stahl ein unbeständiger Werkstoff. Überschreitet die relative Feuchte der Luft Werte von 60 - 70 %, beginnt der Stahl unter Rostbildung zu korrodieren. Eine hohe Chloridkontamination von Metalloberflächen, wie sie im Schwimmbad überwiegend vorliegt, erhöht die Korrosionsgeschwindigkeit des Stahles im wesentlichen dadurch, daß sie die Ionenleitfähigkeit des Elektrolytfilmes heraufsetzt und somit den Ablauf von Korrosionsreaktionen erleichtert. Die Erhöhung gegenüber salzfreien Oberflächen liegt aber in der gleichen Größenordnung, wie sie durch SO₂-verunreinigte Industrieluft erreicht wird. Schwefeldioxid bildet auf der Eisenoberfläche Sulfationen (SO₄²⁻), die eine den Chloridionen vergleichbare korrosionsfördernde Wirkung haben²⁴⁾. Dieser Sachverhalt wird durch einen Vergleich der Korrosionsgeschwindigkeiten der hier interessierenden Metalle bestätigt, wie ihn die Zusammenstellung in Tabelle 2 ermöglicht.

Tabelle 2: Abtragsraten verschiedener Metalle in $\mu\text{m/a}$ ²⁴⁾

Metall	Landluft	Industrieluft		Meeresluft	
	Streubereich	Mittelwert	Streubereich	Mittelwert	Streubereich
unleg. Stahl	6 - 60	140	30 - 160	140	20 - 170
Aluminium	<0,1	1,5	1 - 2	0,7	0,5 - 1
Zink	0,2 - 5	7	6 - 13	4	2 - 7

In dieser Tabelle sind die später diskutierten nichtrostenden Stähle nicht enthalten, weil Korrosionsschäden bei diesen Werkstoffen nicht sinnvoll durch die Angabe von Abtragungsraten beschrieben werden können. Ähnliche Einschränkungen gelten auch für das Aluminium.

Die Gegenüberstellung in Tabelle 2 zeigt, daß die Abtragungsraten von Stahl in SO₂-haltiger Industrieluft und Cl⁻-haltiger Meeresluft vergleichbar sind. Infolge des Chlorgehaltes der Schwimmbadluft kann die Korrosionsbelastung von Stahl insofern verstärkt

werden, als sich bei der Chlorgaskondensation letztendlich nach Reaktion (2) Salzsäure auf der Stahloberfläche bildet. Chlorwasserstoff (HCl) korrodiert den Stahl unter Bildung von Eisenchlorid (FeCl_2). Wie die Tabelle 1 zeigt, wird die kritische Feuchte durch dieses hygroskopische Reaktionsprodukt gesenkt, so daß u.U. schon bei $r_F < 70$ % Korrosionsprozesse auf der Stahloberfläche stattfinden können.

Eisenchlorid reagiert aber mit dem Wasser und dem im Elektrolytfilm gelösten Sauerstoff weiter. Nach dieser mit Hydrolyse bezeichneten Reaktion



entsteht wiederum Salzsäure. Sie kann erneut mit Eisen reagieren und übt somit, wie die aus SO_2 gebildete Schwefelsäure in Industrieluft, eine Multiplikatorwirkung aus.

Auch die Erhöhung des Redoxpotentials eines Elektrolytfilmes in Schwimmhallen durch das Zwischenprodukt der Chlorgaskondensation, die hypochlorige Säure (HOCl), wird sich im Sinne einer Korrosionsbeschleunigung auswirken.

Bei ausreichend hoher Luftfeuchte oder gar bei Schweißwasserbildung an ungeschützten Stahlbauteilen in Schwimmhallenluft wird sich deren Abtragungsrate also im oberen Bereich der Streubreite für die Korrosionsgeschwindigkeit in Meeresluft bewegen. Die sich bildenden Rostschichten schirmen die Oberfläche aber ab, so daß die Korrosionsgeschwindigkeit im Laufe der Zeit abnimmt und später einen gleichbleibenden Wert erreicht. Bei den Angaben in Tabelle 2 handelt es sich aber schon um stationäre Werte für eine langfristige Abschätzung der Lebensdauer.

In allen von der BAM untersuchten Schwimmhallen mit Süßwasser sind jedoch trotz hoher Chloridkontamination wesentlich geringere Abtragungsraten beobachtet worden. Stahlteile waren zwar verrostet. Der Korrosionsangriff bewirkte aber meist lediglich einen gleichförmigen Flächenangriff, mitunter mit geringfügiger Narbenbildung. Auch bei Korrosionsbelastungen, die stärker sind als die den begutachtenden Schwimmhallen, wird sich an dieser Angriffsform prinzipiell nichts ändern. Die geringen Abtragungsraten an den begutachteten Stahlteilen, meist Abhänger oder Befestigungselemente

aus Deckenunterkonstruktionen, sind wahrscheinlich auf die Tatsache zurückzuführen, daß die Luftfeuchten in zeitgemäßen Hallenbädern eher nahe den als weit über den Werten für die kritische Feuchtigkeit liegen. Höhere Korrosionsgeschwindigkeiten sind vor allem dort zu erwarten, wo überkritische relative Feuchtigkeiten oder Schwitzwasser auftreten. Mit zunehmender Feuchtigkeit wird der Elektrolytfilm dicker und die Aktivität von Korrosionsprozessen nimmt zu.

Es wurde darauf hingewiesen, daß auch eine stärkere Korrosionsbelastung von Stahl in Schwimmhallen durch hohes Feuchtigkeitsangebot lediglich zu einem überwiegend gleichmäßigen Flächenabtrag mit geringen Ungleichmäßigkeiten in der Oberflächenstruktur führen wird. Keinesfalls ist beim unlegierten Stahl mit einer Streckgrenze $<700 \text{ N/mm}^2$ ³⁰⁾, aber mit Korrosionsarten wie Lochkorrosion oder Spannungsrißkorrosion zu rechnen, die mitunter spontane Schadensereignisse zur Folge haben könnten. Der Korrosionsfortschritt ist deshalb bei diesem Werkstoff durch einfache Wanddickenmessung leicht zu überwachen. Korrosionszuschläge zur statisch erforderlichen Wanddicke sind geeignete Maßnahmen, um eine Beeinträchtigung der Standsicherheit über lange Betriebszeiten zu vermeiden. Da die Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl in hohem Maße von der Luftfeuchte oder den Betauungsverhältnissen abhängt, sind konkrete Vorschläge für den Korrosionszuschlag kaum möglich. Hier muß von Fall zu Fall entschieden werden. Nach den Beobachtungen der BAM wird man jedoch vielfach mit Zuschlägen auskommen, die sich im unteren Streufeld der Tabelle 3 bewegen, also bei ca. 0,05 mm/a.

In vielen Anwendungsfällen ist aber der auf ungeschützten Stahloberflächen entstehende Rost unerwünscht oder störend. An sichtbaren Flächen wirkt er unschön und suggeriert Verfall und Nachlässigkeit. Aber auch an unsichtbaren Bauteilen kann er sich durch Ablaufspuren oder Abplatzungen störend bemerkbar machen. Unlegierter Stahl wird deshalb selten ohne zusätzlichen Korrosionsschutz eingesetzt. Gebräuchlich für den Anwendungsfall Schwimmbad sind Verzinkung und organische Beschichtungen, auf die später noch eingegangen wird.

4.2 Unlegierter Baustahl, verzinkt

Für Dachtragwerke, Unterkonstruktionen, Verbindungs- und Befestigungselemente und zahlreiche andere Konstruktionsteile in Schwimmhallen wird unlegierter Stahl mit einer Verzinkung als Korrosionsschutzsystem verwendet. Das Korrosionsverhalten verzinkter Teile ist nicht von der Art des Konstruktionsteiles, sondern von der Dicke der Zinkschicht und der Korrosionsbelastung abhängig. Aus diesem Grunde soll das Korrosionsverhalten von Zinkschichten unter der Korrosionsbelastung einer Schwimmhallenatmosphäre allgemein und unabhängig von der Funktion seines "Trägers" im Bauwerk erörtert werden. Die folgenden Ausführungen gelten demnach für alle Konstruktionsteile.

4.2.1 Verzinkungsverfahren

Für das Aufbringen einer Zinkschicht auf Stahl stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Beim Feuerverzinken wird das Stahlteil kontinuierlich im Durchlaufverfahren oder diskontinuierlich beim Stückverzinken in ein Bad aus schmelzflüssigem Zink getaucht. Die Badtemperatur beträgt dabei etwa 450°C.

Beim galvanischen Verzinken wird der Zinküberzug in einem Elektrolytbad durch Anlegen eines Gleichstromes abgeschieden.

Kleinformatige Teile können Zinküberzüge aus Zinkstaub erhalten. Sie werden mechanisch oder durch Diffusion (Sherardisieren) aufgebracht.

Ein weiteres Verfahren ist das Spritzverzinken, bei dem aufgeschmolzenes Zink auf Stahloberflächen gespritzt wird. Die beiden letztgenannten Verfahren werden bei Konstruktionsteilen in Schwimmbädern aber nur selten angewendet.

Die einzelnen Verfahren erzeugen Schichten mit sehr unterschiedlichem Aufbau und verschiedenen Schichtdicken. Eine Zusammenstellung der Verzinkungsverfahren mit den resultierenden Eigenschaften zeigt die Tabelle 3²⁵).

Weil die ebenfalls in der Tabelle 3 aufgeführte Beschichtung mit Zinkstaubfarbe kein rein metallischer Überzug ist und weil das Spritzverzinken sowie Zinkstaubüberzüge in Schwimmhallen ohne

Bedeutung sind, soll lediglich das Korrosionsverhalten der Überzüge aus den vier ersten Verfahren der Tabelle 3 erörtert werden.

Größere Konstruktionsteile in Schwimmbädern werden immer feuerverzinkt, kleinere Teile wie Abhänger, Verbindungs- und Befestigungselemente sind heute aber meist galvanisch verzinkt. Der Tabelle ist zu entnehmen, daß die mit dem letztgenannten Verfahren erzielbaren Schichtdicken wesentlich geringer sind als die durch Feuerverzinken erzeugten. Vielfach werden die Schichtdicken auch als flächenbezogene Masse m_A in g/m^2 angegeben. Aus dieser Angabe läßt sich die Überzugsdicke S in μm nach der Zahlenwertgleichung

$$S = \frac{m_A}{7,2} \quad (4)$$

mit ausreichender Genauigkeit errechnen²⁶⁾.

Durch Feuerverzinken aufgebraachte Überzüge sollen nach DIN 50 976²⁶⁾ folgende in Tabelle 4 zusammengestellte Mindestschichtdicken aufweisen.

Tabelle 3: Zusammenstellung der Korrosionsschutzverfahren mit Zink²⁵⁾

Verfahren	übliche Schichtdicken μm	Schichtaufbau		Ausführung		Oberflächenbehandlung	
		Legierungs- bildung	Zusammen- setzung	Vor- behandlung	Schutz- verfahren	üblich	möglich
Feuerverzinken Stückverzinken (DIN 50 976)	50-150	ja, dicke Schicht	2/3 Legierungs- schicht, 1/3 Zinkschicht	Beizen in Säure	Tauchen in flüssiges Zink	-	Beschichten
Bandverzinken (DVV-Merkmale bzw. DIN 17 162)	15-30	ja, sehr dünne Schicht	1 % Legierungs- schicht, 99 % Zinkschicht	n.d. Sendzimir- Verfahren (Glüh- behandlung)	Durchlaufen durch flüssiges Zink	Chromatieren	Beschichten
Galvanisches Verzinken Einzelbäder (DIN 50 961)	5-25	nein	lamellare Zinkschicht	Entfetten	Zink- Abscheidung mit Gleichstrom im wässrigen Elektrolyten	Chromatieren	Beschichten
Durchlauf- verfahren (DVV-Merkmale)	2,5-7,5	nein	lamellare Zinkschicht	Entfetten		Chromatieren	Beschichten
Spritzverzinken (Thermisches Spritzen, DIN 85 65)	80-150	nein	Zinkschicht aus Zinktropfen mit Oxidhaut	Strahlen: Norm- Reinheitsgrad Sa 3	Aufspritzen von geschmol- zenem Zink	Versiegeln	Beschichten
Metallische Überzüge mit Zinkstaub Mechanisches Plattieren	2-20	nein	Zinkschicht aus „aufge- hämmertem“ Zinkstaub	Entfetten	Mechanisches Aufbringen von Zinkstaub durch Trommeln	Chromatieren	Beschichten
Sherardisieren	10-20	ja	Zink-Eisen- Legierungs- schicht (bis zu 16 % Fe)	Beizen, ggf. Strahlen	Diffusions- verfahren mit Zinkstaub durch Glühen und Trommeln	Passivieren (Chromatieren)	Beschichten
Beschichten mit Zinkstaubfarben (DIN 55 969)	40-120 Shopprimer: 10-20	nein	90-95 % Zn- Staub im Trockenfilm	Strahlen: Norm- Reinheitsgrad Sa 2 1/2-3	gängige Applikations- techniken: Streichen, Spritzen, Tauchen, Rollen	Deckbeschichtungen mit abgestimmten Beschichtungsstoffen	

Gruppe der Gegenstände	Mindestschichtdicke in μm
Stahlteile Dicke <1mm	50
Dicke 1 - 3 mm	55
Dicke 3 - 6 mm	70
Dicke >6 mm	85
Kleinteile	55
Gußeisenteile	70

Tabelle 4:
Mindestzinkschichtdicken
nach DIN 50 976

4.2.2 Korrosionsverhalten

Das Korrosionsverhalten ³⁹⁾ galvanisch und durch Tauchen im Zinkbad erzeugter Überzüge unter atmosphärischen Klimabedingungen allgemein, aber auch im Schwimmbadklima ist vergleichbar. Zinkschichten werden an feuchter Atmosphäre zunächst korrodiert. Die dabei entstehenden Korrosionsprodukte aus basischen Zinkkarbonaten bilden eine festhaftende Deckschicht, die das Grundmetall abschirmt und den weiteren Korrosionsangriff stark verringert. In der freien Umgebung werden diese Deckschichten von Wind und Wetter zwar abgewaschen, sie erneuern sich aber immer wieder. Aus diesem Grunde werden sie langsam aber zunehmend dünner. Tabelle 2 enthält Angaben über die in den verschiedenen Klimaten zu erwartenden Abtragswerte für Zink. Sie gelten aber auch für die Korrosionsgeschwindigkeiten von Zinkschichten ^{17,27)}. In DIN 50 959 ⁶³⁾ werden folgende Werte angegeben:

- Industrieatmosphäre: 9 - 20 μm
- Meeresklima: 2 - 20 μm

Mit diesen Abtragswerten und den Mindestdicken in Tabelle 4 kann die Lebensdauer von Zinküberzügen auf Stahlbauteilen in der Atmosphäre abgeschätzt werden. Die Zinkschicht wird in allen Klimaten wesentlich langsamer korrodiert als ungeschützter Stahl. Hierauf beruht ihre Schutzwirkung auf Stahl. Ist der Überzug abgetragen, wird der Grundwerkstoff wie ein ungeschütztes Material korrodiert. Die Schutzdauer des Zinküberzugs ist also der Zinkschichtdicke direkt proportional. Galvanische Überzüge weisen daher infolge ihrer geringeren Dicke gegenüber einer Feuerverzinkung wesentlich kürzere Lebenszeiten auf. Zinkschichten werden an der Atmosphäre nahezu gleichmäßig abgetragen. Lochfraß oder andere lokal verstärkte Korrosionsangriffe sind nicht zu erwarten, wie vorstehend bereits erwähnt wurde.

Auch beim Zink ist der Unterschied der Abtragsraten in Industrieluft und Meeresklima nicht sehr groß. In letzterem sind die Abtragsraten sogar noch etwas geringer. Wie beim Eisen ist also auch beim Zink zu beobachten, daß Chloride und Sulfate in vergleichbarer Weise korrosionsstimulierend wirken.

In Schwimmhallen ist an allen, also auch an verzinkten Stahlteilen mit einem hohen Salzgehalt zu rechnen. Auch beim Zink

ist zusätzlich der Einfluß geringer Mengen an Salzsäure sowie eine Erhöhung der Oxidationskraft des Oberflächenelektrolyten zu beachten.

Alle diese beschriebenen stimulierenden Einflüsse werden zunächst für eine verhältnismäßig hohe Anfangskorrosionsgeschwindigkeit sorgen. Die bei dieser Reaktion entstehenden Korrosionsprodukte, nach Tabelle 1 insbesondere das unter diesen Beanspruchungen zu erwartende Zinkchlorid, senken den Wert für die kritische Feuchtigkeit. Zink wird unter Schwimmhallenbedingungen also immer korrodiert. Sehr schnell bilden sich bei diesem Korrosionsangriff aber stabile, schwer lösliche hydroxidische Reaktionsprodukte des Zinks mit Chlorid- und Sulfationen, sogenannte basische Salze. Diese Salze binden erstens die stimulierenden Anionen ab, machen sie also inaktiv. Zusätzlich schirmen sie die Zinkoberfläche vor dem Zutritt weiterer Stimulatoren erfolgreich ab. Die stationären Abtragungsraten für langfristige Lebensdauerabschätzungen sind dann entsprechend Tabelle 2 im Vergleich zum Stahl sehr niedrig.

Zink ist wesentlich unedler als Stahl. In Verbindung mit Stahl kann es diesen deshalb in vielen Fällen kathodisch schützen. Die diesbezügliche Wirkung einer Zinkschicht an der Atmosphäre wird aber häufig überschätzt. Wegen der oben geschilderten Deckschichtbildung wird nämlich nicht nur die Korrosion der Zinkschicht verringert, sondern auch ihre Wirksamkeit als Schutzkathode. Ihre Fernwirkung reicht in der Regel nicht einmal aus, um Schnittkanten zu schützen. Sie rosten wie bei ungeschütztem Eisen. Allerdings sind die durch Schnittkantenrost bedingten Querschnittsminderungen an einem Stahlteil gegenüber denen durch Flächenrost meist zu vernachlässigen. Sie beeinträchtigen also die Standsicherheit der meisten Bauteile nicht nennenswert.

Hohe Abtragungsraten an Zink und Zinkschichten sind nur dort zu erwarten, wo sich infolge hoher Luftfeuchte an der Bauteiloberfläche Tauwasser niederschlagen und längerfristig halten kann. Der hierdurch entstehende dicke Wasserfilm oder die Wassertropfen behindern den Zugang der deckschichtbildenden Atmosphärenteilchen an die Metalloberfläche. Infolgedessen bilden sich voluminöse weiße Schichten mit nur geringer Haftung. Da dieser sogenannte Weißrost keine Schutzfunktion besitzt, wird das Zink mit hoher Geschwindigkeit

keit korrodiert. Durch den im Schwimmbad zu erwartenden Chlorgehalt kann sich Salzsäure in dem Tauwasser bilden, die den Abtrag zusätzlich beschleunigt. Dünne galvanisch aufgetragene Zinkschichten können unter einer solchen Schwitzwasserbelastung in einigen Tagen zerstört sein.

Im allgemeinen wird man in Schwimmbädern für Zinkschichten mit einem mittleren Abtrag von $5 \mu\text{m/a}$ rechnen können. Feuerverzinkte Stahlteile mit Zinkschichten von $60 - 70 \mu\text{m}$ werden demnach ohne weiteren Schutz über einen Zeitraum von mindestens 10 Jahren ausreichend geschützt sein. Meist werden längere Fristen vergehen, bis der Stahl großflächig zu rosten beginnt, zumal die Schichtdicken an verzinkten Großteilen materialbedingt meist höher sind als die geforderten Mindestdicken. Bei Ausschreibungen von verzinkten Teilen für Schwimmbäder sollten daher abweichend von den normgemäßen Mindestschichtdicken von vornherein dickere Schichten gefordert werden. Da die vergleichsweise dünnen galvanischen Zinkschichten nur für kurze Zeit schützen, sollten tragende Stahlbauteile in Schwimmhallen immer feuerverzinkt sein. Die hierbei zu beachtenden Konstruktionsregeln werden in^{33,38)} erörtert. Auch Schrauben, Muttern und andere Verbindungselemente können feuerverzinkt werden^{33,37)}. Lieferanten werden in³⁴⁾ genannt. Mit wesentlich verkürzten Schutzdauern ist aber dort zu rechnen, wo sich an kühleren Oberflächen permanent Schwitzwasser halten kann. Hier ist der Korrosionsschutz durch Zinkschichten alleine, also ohne einen weiteren Schutz, z.B. durch Lackierungen, sicher unzureichend.

Wie bereits angedeutet, werden Zinkschichten überwiegend gleichförmig abgetragen. Sie üben auf Baustähle mit Streckgrenzen unter ca. 700 N/mm^2 ³⁰⁾, unabhängig vom Aufbringungsverfahren, auch keine spannungsrißkorrosionsfördernde Wirkung aus. Als unedles Metall sind sie aber beim Zusammenbau mit wesentlich edleren Metallen gefährdet. So kann eine durch Kontaktkorrosion bewirkte Korrosionsbeschleunigung durch Berührung insbesondere mit Kupfermaterialien nicht nur am Zink, sondern später auch beim Grundwerkstoff Stahl zu Korrosionsschäden führen. Im Kontakt mit ungeschütztem Stahl wird die Zinkschicht ebenfalls schnell abgetragen. Weniger schädlich ist hingegen eine Kombination mit Aluminiumwerkstoffen (kupferfrei) und nichtrostendem Stahl³¹⁾. Da in dieser Frage die Meinungen differieren¹⁷⁾, sollten solche Verbindungen nach Möglichkeit auch vermieden werden, zumal die ver-

hältnismäßig dünnen Zinkschichten nur ein geringes Puffer für Kontaktkorrosion bieten. Eine Orientierungshilfe bei der Beurteilung der Korrosionsgefährdung von Metallpaarungen in der Atmosphäre gibt Tabelle 5³²⁾.

Werden verzinkte Teile geschweißt, muß die Schweißnaht und ihre Umgebung nachträglich geschützt werden, wobei der nachträgliche Schutz der Verzinkung möglichst gleichwertig sein sollte. Für das Nachbessern stehen eine Reihe von Verfahren zur Verfügung. Thermisch gespritzte Zinküberzüge sollen sich bisher am besten bewährt haben³⁵⁾.

4.3 Aluminiumwerkstoffe

Aluminiumwerkstoffe sind in Schwimmhallen vergleichsweise selten als tragendes Bauelement anzutreffen. Vereinzelt findet man jedoch Abhänger für Unterdecken oder Unterdecken selbst, die aus Aluminiumlegierungen gefertigt sind. Aus diesem Grunde soll kurz auch das Korrosionsverhalten dieses Metalles beschrieben werden. Abgesehen von den kupferhaltigen, aushärtbaren Legierungen zeigen alle für das Bauwesen empfohlenen Legierungen unter Schwimmhallenbedingungen ein vergleichbares Korrosionsverhalten.

Aluminium ist wie Zink ein unedler Werkstoff. Seine unter atmosphärischer Korrosionsbelastung recht gute Beständigkeit beruht auf einer Oxidschicht, die sich auf diesem Werkstoff bildet. Diese mit Passivschicht bezeichnete Schutzschicht bildet sich bereits im Kontakt mit Luft. Sie ist in feuchter Luft dicker als in trockener und kann durch verschiedene Oxidationsverfahren verstärkt werden. Hierdurch verbessert sich ihre Korrosionsschutzwirkung⁴⁰⁾.

Aggressive Bestandteile der Atmosphäre, in Schwimmhallen besonders die Chloride, zerstören bei gleichzeitig ausreichendem Feuchteangebot die Passivschicht. Anschließend wird das Aluminium lochfraßförmig angegriffen. Wegen des dünnen Elektrolytfilmes bilden sich jedoch nur kleine Löcher auf der Aluminiumoberfläche. Die bei diesem Angriff entstehenden Korrosionsprodukte bilden bald eine graue Kruste. Sie verstopft die Löcher und schirmt auch die übrige Metalloberfläche ab. Der Lochfraß kommt dann sowohl unter Chloridbelastung als auch unter Industrieluft nach Eindringtiefen von 50 - 100 µm zum Stillstand^{41, 42)}. Bei anderen Unter-

suchungen sind in maritimer Umgebung nach 30 Jahren maximale Eindringtiefen um 250 µm und mittlere Lochtiefen von 150 µm ermittelt worden. Die Zugfestigkeit der ausgelagerten Proben war nach dieser Beanspruchungsdauer lediglich um 12 % abgemindert⁴³⁾. Lediglich die Legierungen mit höherem Kupfergehalt werden stärker angegriffen. Sie sollten daher für Tragkonstruktionen mit Korrosionsbelastung nicht verwendet werden.

Tabelle 5: Kontaktkorrosion bei Metallpaarungen³²⁾

Hinsichtlich Kontaktkorrosion betrachteter Werkstoff		Paarungswerkstoffe												
		Magnesiumlegierung	Zink	Feuerverzinkter Stahl	Aluminiumlegierung	Cadmiumüberzug	Baustahl	Niedriglegierter Stahl	Stahlguß	Chromstahl	Blei	Zinn	Kupfer	nichtrostender Stahl
Magnesiumlegierung	klein groß		S M	S M	S M	S M	S S	S S	S S	S S	S S	S S	S S	S S
Zink	klein groß	M G		G G	S G	S G	S G	S G	S G	S G	S G	S G	S G	S G
Feuerverzinkter Stahl	klein groß	M G	G G		M G	M G	S G	S G	S G	S G	S G	S G	S G	S G
Aluminiumlegierung	klein groß	M G	G G	G M		G G	S G	G G	S M	M M	S S	S S	S S	S S
Cadmiumüberzug	klein groß	G M	G G	G M	G G		S G	S G	S G	S G	S G	S G	S G	S G
Baustahl	klein groß	G G	G G	G G	G G	G G		M G	S G	S G	S G	S G	S G	S G
Niedriglegierter Stahl	klein groß	G G	G G	G G	G G	G G	G G		G G	S G	S G	S G	S G	S G
Stahlguß	klein groß	G G	G G	G G	G G	G G	G M			S G	S G	S G	S S	S S
Chromstahl	klein groß	G G	G G	G G	G G	G G	G G	G G			M G	M G	S S	S G
Blei	klein groß	G G	G G	G G	G G	G G	G G	G G	G M	G G		G G	G G	G G
Zinn	klein groß	G G	G G	G G	G G	G G	G G	G G	G G	G M	G G			
Kupfer	klein groß	G G	G G	G G	G G	G G	G G	G G	G G	M M	M M	S M		G G
nichtrostender Stahl	klein groß	G G	G G	G M	G G	G G	G G	G G	G G	M M	M M	M M	G G	

*) Verhältnis der Oberfläche des „betrachteten“ Werkstoffes zur Oberfläche des „Paarungswerkstoffes“.

In der Schwimmhalle wird Aluminium in ähnlicher Weise belastet wie in Meeresatmosphäre, die zusätzlich mit sauren Atmosphärenteilchen (SO_2 , Cl_2) verunreinigt ist. Da in einer solchen Umgebung nicht mit einem stärkeren Angriff als im Seeklima zu rechnen ist, gelten die vorstehenden Angaben auch für diesen Anwendungsbereich. Wo kein Tauwasser an der Oberfläche entsteht, kann beim Aluminium im Schwimmhallenbereich für die Abschätzung der Querschnittsminderung die in Tabelle 2 genannte mittlere Abtragsrate von $1,5 \mu\text{m/a}$ zugrunde gelegt werden.

Wenn kaum mit Schweißwasserbildung zu rechnen ist und wenn der optische Eindruck keine Rolle spielt, ist ungeschütztes Aluminium auch in der Schwimmhallenluft einsetzbar.

Bild 3 zeigt einen Querschnitt durch einen zwar stark chlorid- aber nicht tauwasserbeaufschlagten Abhänger aus einer unbekannten Aluminiumlegierung nach ca. 15-jähriger Einsatzdauer in einer Schwimmhalle. Die maximale Lochtiefe beträgt ca. $100 \mu\text{m}$, obwohl in der Deckschichtkruste bis zu 20 % Chlorid enthalten waren.

Weil Aluminium bereits in Gegenwart eines chloridhaltigen Elektrolyten in der Atmosphäre korrodiert wird, hat die schwimmhallenspezifische und chlorbedingte Erhöhung des Redoxpotentials auf der Metalloberfläche keine nennenswert stimulierende Wirkung.

Einige Aluminiumlegierungen sind bei der in Schwimmhallen vorliegenden Korrosionsbelastung unter gleichzeitiger Einwirkung einer Zugbelastung empfindlich gegenüber Spannungsrißkorrosion. Spannungsrißkorrosion ist eine Korrosionsart, bei der in spezifischen Korrosionsmedien verformungsarme Materialtrennungen (Risse) auftreten, ohne daß das Material stark abgetragen sein muß. Bei Aluminiumwerkstoffen neigen die höherfesten AlZnMg und AlZnMgCu-Legierungen sowie AlMg-Legierungen mit $>3 \%$ Mg bei bestimmten Gefügeständen zur Spannungsrißkorrosion^{40,44}). Da eine ausreichend große Zahl an Legierungen ohne Spannungsrißkorrosion-Anfälligkeit zur Verfügung steht, sollte in Schwimmhallen auf den Einsatz dieser Legierungen verzichtet werden. Ist der Einsatz von Aluminiumlegierungen geplant, die empfindlich gegenüber Spannungsrißkorrosion sind, sollten Erkundigungen über die Empfindlichkeit dieses Werkstoffes gegenüber Spannungsrißkorrosion im vorliegenden Gefügestand eingeholt werden.

Wie auch der vorstehend abgehandelte Werkstoff unlegierter Stahl und auch Zinküberzüge, sind Aluminiumwerkstoffe bei dauernder Schwitzwasserbelastung nicht ausreichend korrosionsbeständig. Unter dieser Beanspruchung können sich keine schützenden Deckschichten ausbilden. Auch in diesem Fall würden sich die aggressiven Bestandteile der Schwimmbadluft korrosionsbeschleunigend auswirken.

Auch Aluminium ist im Kontakt mit anderen edleren Konstruktionsmetallen korrosionsgefährdet. Tabelle 5 erlaubt auch für diesen Werkstoff eine Abschätzung der Kontaktkorrosionsgefahr. In jedem Fall sollte eine Kombination mit ungeschütztem Stahl und Kupferwerkstoffen unterbleiben. Hingegen sind Verbindungen mit nichtrostendem und verzinktem Stahl dort unproblematisch, wo der Aluminiumwerkstoff allein ausreichend korrosionsbeständig ist.

Selbstverständlich muß auch Aluminium nach den Gesichtspunkten des korrosionsschutzgerechten Konstruierens verarbeitet werden, wie sie für den Stahlbau in DIN 55 928, Teil 2⁴⁵⁾ und für das Aluminium speziell in⁴⁰⁾ beschrieben werden. So müssen insbesondere Spalte, Hohlräume und Flächen vermieden werden, in oder auf denen sich Wasser sammeln kann. Diese Forderung gilt aber für alle übrigen metallischen Konstruktionswerkstoffe gleichermaßen.

4. 4 Nichtrostender Stahl

4.4.1 Werkstoff

Als nichtrostende Stähle gelten nach DIN 17 440⁴⁶⁾ Stähle, die sich durch besondere Beständigkeit gegen chemisch angreifende Stoffe auszeichnen; sie haben im allgemeinen einen Chromgehalt von mindestens 12 % und einen Kohlenstoffgehalt von höchstens 1,2 %. Durch Zulegieren von Nickel, Molybdän, Titan u.a. Legierungselemente kann man die mechanischen Eigenschaften und die Korrosionsbeständigkeit dieser Werkstoffgruppe verbessern. Je nach Zusammensetzung und Gefügestand werden diese Stähle unterteilt in:

- martensitische Stähle
- ferritische Stähle
- ferritisch-austenitische Stähle und
- austenitische Stähle.

Die bedeutendste Gruppe sind die austenitischen Stähle mit Chrom und Nickel als Hauptlegierungsbestandteilen. Sie sind unmagnetisch und daher leicht von den übrigen Stählen zu unterscheiden. Im allgemeinen enthalten sie 18 - 25 % Chrom (Cr) und 8 - 25 % Nickel (Ni), bis zu 18 % Mangan (Mn) und bis 4,5 % Molybdän (Mo) sowie Titan (Ti), Niob (Nb), Stickstoff (N) und Kupfer (Cu).

Vier Standardsorten dieser Gruppe sind vom Institut für Bautechnik in Berlin bauaufsichtlich zur Verwendung als Flachzeug, Profile und Rohre für Stahlbauteile, Verankerungs- und Verbindungselemente mit vorwiegend ruhender Belastung zugelassen⁴⁾. Es sind dies die Stähle mit folgender Kennzeichnung:

- Werkstoff Nr. 1.4301 und 1.4541
- Werkstoff Nr. 1.4571 und 1.4401

Als Schraubenmaterial für die Bautechnik sind die austenitischen Stähle mit der Bezeichnung A2 und A4 nach DIN 267, Teil 11⁵⁸⁾ zugelassen. Sie entsprechen in ihrer Zusammensetzung und im Korrosionsverhalten etwa den oben aufgezählten Stählen. Alle diese Stähle werden auch für Konstruktionsteile in Schwimmhallen eingesetzt.

Die geläufigen Bezeichnungen für die beiden zugelassenen Stahlgruppen V2A und V4A sind Herstellerbezeichnungen. Sie kennzeichnen zwei verschiedene austenitische Stahlgruppen, nicht aber einen bestimmten Stahl. Wegen ihrer unzureichenden Kennzeichnungsschärfe können und sollten sie deshalb zur exakten Beschreibung eines Stahles nicht verwendet werden. Hingegen wird ein Stahl mit Hilfe seiner Werkstoff Nr. oder der DIN Kurzbezeichnung zureichend charakterisiert. Der Werkstoff Nr. 1.4301 entspricht nach DIN 17 440⁴⁶⁾ der Kurzname X5CrNi1810. Letzterer gibt gleichzeitig Hinweise zur Konzentration der Legierungselemente. Der Wärmebehandlungszustand, der Verfestigungszustand und die Ausführungsart werden mit Kurzzeichen hinter der Werkstoffbezeichnung gekennzeichnet.

4.42 Korrosionsverhalten

Die Korrosionsbeständigkeit der nichtrostenden Stähle beruht auf einer dünnen, unsichtbaren Passivschicht, die sich auf

Stählen mit mindestens 12 % Chrom bildet. Sie ist nur wenige Atomlagen dick und schützt den Stahl in vielen Medien. Durch Erhöhung des Chrom- und Nickelgehaltes wird der Beständigkeitsbereich dieser Schicht erweitert.

Für den Einsatz bei stärkerer Korrosionsbelastung, wie sie auch in Schwimmhallen zu erwarten ist, kommen nur die austenitischen nichtrostenden Stähle in Betracht. Nur deren Korrosionsverhalten soll daher im folgenden erörtert werden. Sie sind in vielen Korrosionsmedien gegen abtragende Korrosion immun. Diese gute Eigenschaft wird durch die Empfindlichkeit dieser Werkstoffgruppe insbesondere in chloridhaltiger Umgebung getrübt. Chloridionen sind nämlich in der Lage, die Passivschicht örtlich zu zerstören. Die Folge dieser selektiven Zerstörung der Schutzschicht sind Korrosionsarten wie Lochfraß, Spaltkorrosion und Spannungsrißkorrosion (SpRK).

Da das Chloridion unter den Halogeniden besonders schädlich ist, wird die hierdurch ausgelöste Korrosion oft auch "Chloridkorrosion" genannt. Das Bromidion hat eine ähnliche Wirkung, kommt aber selten vor. Fluoride und Jodide haben hingegen keine stimulierende Wirkung^{59,60}).

Werden nichtrostende Stähle z.B. beim Schweißen wärmebehandelt, treten Gefügeveränderungen auf, die eine lokale Verringerung der Korrosionsbeständigkeit innerhalb der Wärmeeinflußzone (WEZ) zur Folge haben. Der hierdurch bedingten Sensibilisierung des Stahles gegen interkristalline Korrosion (IK) schon in milden Korrosionsmedien wie Wasser, wird durch Legieren mit Titan oder Niob oder durch Absenken des Kohlenstoffgehaltes vorgebeugt. Die erste Methode wird z.B. bei den Stählen der Werkstoff Nr. 1.4541 und 1.4571, die zweite bei den Stählen 1.4301 und 1.4401 angewendet.

Unter den in der Zulassung⁴⁾ beschriebenen Voraussetzungen sind alle vier Stähle nach dem Schweißen meist unempfindlich gegen IK. Diese Korrosionsart soll deshalb nicht weiter diskutiert werden. Wegen ihrer Relevanz im Schwimmhallenklima sollen aber die drei erstgenannten Korrosionsarten im folgenden ausführlicher beschrieben werden. Sie werden in DIN 50 900²²⁾ definiert.

4. 4.2.1 Lochkorrosion

Lochkorrosion ist eine Korrosionsform, bei der kraterförmige, die Oberfläche unterhöhrende oder nadelstichartige Vertiefungen auftreten. Außerhalb der Lochfraßstellen liegt praktisch kein Flächenabtrag vor. Die Tiefe der Löcher ist meist größer als ihr von außen erkennbarer Durchmesser.

Bei nichtrostenden Stählen wird die Lochkorrosionsgefahr durch zunehmenden Gehalt an Stimulatoren, steigende Temperatur und Oxidationskraft (Redoxpotential) des Korrosionsmediums erhöht. Im Einsatzfall Schwimmhalle ist nicht nur mit der Anwesenheit von Chloridionen als Stimulator, sondern nach Reaktion (1) auch mit dem Hypochlorit (ClO⁻) und nach Reaktion (1) und (2) auch mit Salzsäure zu rechnen. ClO⁻ stimuliert in doppelter Weise, weil es sowohl die Passivschicht zerstört und auch das Redoxpotential stark erhöht. Elektrolytfilme mit hohem Redoxpotential, die in chlorhaltiger Schwimmhallenluft entstehen und deren Gehalt an Chloridionen angereichert werden kann, sind deshalb besonders lochkorrosionsbegünstigend.

Um Lochkorrosion an austenitischen Stählen auslösen zu können, muß der Oberflächenelektrolyt gewisse Mindestvoraussetzungen erfüllen. Der Weg dorthin kann lang sein. Aus diesem Grunde entstehen Löcher nicht sofort, sondern erst nach "Inkubationszeiten", die Monate betragen können. Wird dem Elektrolyten keine Zeit gelassen, sich ausreichend aufzukonzentrieren, kann kein Lochfraß entstehen. Reinigen der Oberfläche oder ständiges Abspülen wirken daher korrosionsschützend. Ablagerungen, Spalte, sowie Zunderschichten, Anlauffarben und Gefügeveränderungen, wie sie beim Schweißen entstehen können, wirken hingegen stark stimulierend.

Hat sich ein Loch erst einmal entwickelt, bildet sich in diesem ein stark salzsaurer und chloridreicher Lochelektrolyt mit autokatalytischer Wirkung auf das Lochwachstum. Der pH-Wert des Lochelektrolyten liegt unter 1,5⁶¹⁾, also im stark sauren Bereich. Die Löcher sind meist mit einer Rosthaube abgedeckt und deshalb mit bloßem Auge nicht gleich als solche erkennbar. Vielfach bilden sich an der Atmosphäre zunächst Rosthöfe um die nadelstichartig beginnenden Löcher. In vorgeschrittenem Zustand können die Löcher auskorrodieren und zu Korrosionsmulden zusammenwachsen. Der Rostbelag breitet sich entsprechend aus.

Mittels Legierungsmaßnahmen kann die Beständigkeit gegenüber Lochkorrosion verbessert werden. Eine Erhöhung des Nickel, Chrom und vor allem des Molybdängehaltes haben einen derart positiven Einfluß. Die Stähle mit den Werkstoff Nr. 1.4571 und 1.4401 sind deshalb lochkorrosionsbeständiger als die Stähle 1.4301 und 1.4541. Aus diesem Grunde sollten nur die ersten beiden in Schwimmhallen überhaupt angewendet werden.

Die Praxis hat jedoch nachgewiesen, daß die Beständigkeit der beiden Mo-haltigen Stähle 1.4571 und 1.4401 nicht ausreicht, um sie gegenüber Schwimmhallenluft vollkommen resistent zu machen. Auch sie erleiden Lochkorrosion, wenn die Oberflächenelektrolyte ausreichend aggressiv, d.h. mit Stimulatoren angereichert sind.

Ein Beispiel aus der Schwimmhallenpraxis soll zeigen, daß unter ungünstigen korrosionsklimatischen Voraussetzungen Lochkorrosion auch zu beachtlichen Querschnittsverlusten führen kann. Abhänger aus einer Unterdeckenkonstruktion, Material 1.4301, zeigten nach fünfjährigem Einsatz die in den Bildern 4 - 5 erkennbaren Rosterscheinungen. Bereits in Bild 5 wird die Ursache für den Oberflächenrost sichtbar, nämlich Lochkorrosion, deren Ausmaß aber erst in den Schliffbildern 6 und 7 bei der metallographischen Untersuchung zutage tritt. Im Rost dieses Abhängers sind Chloridgehalte von 5,8 % Cl^- gefunden worden. Sein pH-Wert betrug 2,9.

Aber auch die molybdänhaltigen Stähle werden durch Lochkorrosion angegriffen. Dem Verfasser sind bisher drei Fälle bekannt, bei denen Lochkorrosion verknüpft mit Oberflächenrost an dem Stahl 1.4571 entstanden ist. In allen Fällen waren hohe Chloridkonzentrationen auf den Oberflächen anwesend. Ein Beispiel zeigen die Bilder 8 - 10 anhand eines 10 Jahre alten Abhängers. Die Bilder 8 und 9 veranschaulichen das äußerliche Erscheinungsbild, Bild 10 eines metallographischen Schiffes zeigt das Ausmaß des Angriffes. Auch dieser Schaden war mit Oberflächenrost gekoppelt, mit bloßem Auge aber kaum zu erkennen. Rost oder rostähnliche Flecken an der Oberfläche nichtrostenden Stahles, deren Ausdehnung die punktueller Rosthöfe überschreiten, sollten daher immer Signalwirkung haben.

4.4.2.2 Spaltkorrosion

Spaltkorrosion ist eine örtliche Korrosion in Spaltung wie sie unter Dichtungen, Überlappungen, Ablagerungen etc. entstehen

können. Ihr Reaktionsmechanismus ist dem der Lochkorrosion sehr ähnlich. Auch in Spalten entsteht nach einer Inkubationszeit ein aggressiver Spaltelektrolyt mit dramatischen Folgen für das Metall im Spaltbereich. Nichtrostende Stähle sind gegenüber dieser Korrosionsart noch viel empfindlicher als gegenüber Lochkorrosion. Korrosionsmedien wie chloridhaltige Trinkwässer erzeugen an glatten sauberen Oberflächen austenitischer Stähle gewöhnlich keinen Lochfraß; sie sind aber imstande, in engen Spalten lokale Korrosion auszulösen. Diese Korrosionsart hat aber für Tragkonstruktionen in Schwimmhallen keine so große Bedeutung wie an Teilen, die mit einem wässrigen Korrosionsmedium umspült werden.

4.4.2.3 Spannungsrißkorrosion

Spannungsrißkorrosion führt bei austenitischen Cr/ Ni-Stählen in chloridhaltigen wässrigen Medien zu transkristalliner Rißbildung, die zu einem nahezu verformungsfreien Bruch dieses Werkstoffs führen kann. Transkristalline Risse verlaufen durch die Kristallite eines Stoffes hindurch, interkristalline hingegen entlang der Korngrenzen. Transkristalline SpRK bei diesen Stählen ist anodisch, sie breitet sich also durch anodische Auflösung im Rißgrund aus.

Voraussetzung für das Entstehen von SpRK ist außer einer genügend hohen Chloridkonzentration die Anwesenheit von Zugspannungen. Die kritischen Grenzspannungen sind unter realer Beanspruchung aber so gering, daß Eigenspannungen im Werkstoff schon ausreichend hoch sind.

In neutralen chloridhaltigen Medien ist die für die Entstehung von Lochkorrosion bis zur Siedetemperatur des Wassers erforderliche Chloridkonzentration sehr hoch. Sie wird fast nur in Lochelektrolyten erreicht, weshalb diese Korrosionsart auch meist von Lochfraßstellen ausgeht^{59,60}). Ablagerungen, Spalte und Wasser/Dampf-Grenzflächen haben den gleichen stimulierenden Einfluß. Nach dem bisherigen Kenntnisstand ist diese Schadensart bisher weitgehend auf einen Temperaturbereich von über 40 - 50 °C beschränkt^{47,55}). Der Einfluß von Molybdän auf die Anfälligkeit gegenüber dieser chloridinduzierten SpRK ist gering aber positiv, der Einfluß von Nickel dagegen stark⁵⁹), aber unterschiedlich. Bis ca. 10 % scheint Nickel in Cr-Stählen (18 - 20 % Cr) die Anfälligkeit zu erhöhen, erst darüber zu verringern. Ab ca. 30 %

Nickel sind die nichtrostenden Stähle nahezu immun. Molybdängehalte haben ab 5 % eine vergleichbare Wirkung⁶²⁾. Die beiden vom Institut für Bautechnik zugelassenen⁴⁾ Cr/Ni-Stähle mit 2 - 2,5 % Molybdän sind in Gegenwart von Lochkorrosion also nicht entscheidend beständiger als die Mo-freien Sorten. Alle Standard Chrom-Nickel-Stähle weisen eine vergleichsweise geringe Beständigkeit gegen SpRK auf⁶²⁾.

Obgleich Speidel SpRK⁶²⁾ in hochkonzentrierten NaCl-Lösungen an vorgekerbten Proben bis zu Raumtemperaturen hinunter beobachtet hat, ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von chloridinduzierter SpRK in neutralen Salzlösungen bei Raumtemperatur sehr gering. Eine Reihe von Untersuchungen weisen aber nach^{48 - 52, 54)}, daß transkristalline und interkristalline SpRK in sauren, chloridhaltigen Lösungen ohne weiteres bereits bei Raumtemperatur auftreten kann. Nach dem Unglück im Schwimmbad Uster hat diese Erkenntnis auch Eingang in das deutsche Normenwerk gefunden. In DIN 50929, Teil 1⁵³⁾, heißt es nun: "Austenitische Chrom-Nickel-Stähle können durch Chloridionen bei erhöhter Temperatur (etwa über 45 °C), in sauren, chloridhaltigen Medien auch bei Raumtemperatur Spannungsrißkorrosion erleiden."

Risse, die in saurem Milieu entstehen, sind in der Regel transkristallin, können aber auch interkristallin verlaufen⁵⁹⁾. Über die Einflüsse von Legierungselementen, Spannungen, Temperaturen etc. ist bisher noch nicht so viel bekannt, wie bei der chloridinduzierten SpRK in neutralem Milieu. Molybdänzusätze vermindern zwar die Stärke des Angriffs durch SpRK⁴⁸⁾. Die beiden Stähle 1.4571 und 1.4401 sind aber nicht immun.

Wie weiter oben bereits erwähnt wurde, ist aber gerade in chloridhaltiger Schwimmbadluft mit der Entstehung salzsaurer, chloridhaltiger Elektrolyte zu rechnen. Entwickelt sich auf einem Stahlbauteil im Schwimmbad ein korrosionsfähiger Elektrolyt, lösen sich in diesem nicht nur die Chloride, sondern auch das Chlor, das mit der Luft herangeführt wird. Entsprechend den Reaktionen (1) und (2) ist das Endprodukt der Löslichkeit von Chlor im Elektrolyten Salzsäure (HCl). Weil das primäre Lösungsprodukt, HOCl, schon durch Spuren von Nickel- und Eisenionen zu HCl umgesetzt wird, kann der Oberflächenelektrolyt nahezu jedes an die Metalloberfläche gelangende Chlormolekül aufnehmen.

Auf den Oberflächen von Metallabhängern aus Zwischendeckenhohlräumen in Hallenbädern sind u. a. die in Tabelle 6 zusammengestellten pH-Werte und Chloridgehalte gemessen worden.

Tabelle 6: pH-Werte und Chloridgehalte von Korrosionsprodukten auf Abhängern aus Schwimmhallen

Werkstoff	pH-Wert	Cl-Gehalt in %
verzinkter Stahl	7 - 7,3	
Stahl, verrostet	4,7 - 6,3	0,6 - 4
Aluminium	ca. 9,5	12 - 21
CrNi-Stahl	2,9	5,8

Die in Tabelle 6 zusammengefaßten Ergebnisse zeigen, daß die auf Zink-, Stahl- und Aluminium entstehende Salzsäure durch Reaktion mit dem Metall und mit den hydroxidischen Korrosionsprodukten als Säure weitgehend unschädlich gemacht wird. Auf der passiven Oberfläche nichtrostender Stähle kann sie zunächst aber nicht abreagieren. So steigt im Laufe der Zeit der Chloridgehalt des Oberflächenelektrolyten und sein pH-Wert sinkt kontinuierlich ab, bis eine Zusammensetzung erreicht ist, bei der die Passivschicht zerstört wird. Torchio⁵¹⁾ hat die Folgen dieses Anreicherungsprozesses auf das Korrosionsverhalten von CrNi-Stahl in einem Diagramm in Abhängigkeit vom Salzsäure- und Gesamtchloridgehalt dargestellt. Bild 11 zeigt, daß je nach Säure- und Chloridkonzentration gleichförmiger Angriff, Loch- oder SpRK beobachtet wird. So kann schon in einer verdünnten Salzsäure von ca. 0,4 % transkristalline SpRK auftreten, wenn der Gesamtchloridgehalt ca. 7 % übersteigt. Liegt der Gesamtchloridgehalt unter ca. 7 %, ist lediglich Lochfraß zu erwarten. Derartige Elektrolyte sind nicht abnorm. Ihre Entstehung ist nach den vorstehenden Ausführungen in Schwimmhallenluft durchaus denkbar. Somit besteht in dieser Atmosphäre immer eine latente Korrosionsgefahr für den nichtrostenden Stahl. Ob und welche Art von Schäden entstehen, hängt von der mikroklimatischen und der mechanischen Belastung des Bauteiles ab.

Salzsäure, chloridhaltige Elektrolyte entstehen andererseits aber auch bei der Loch- und Spaltkorrosion in neutralen chloridhaltigen Medien innerhalb von Löchern oder Spalten. Umso erstaunlicher ist, daß SpRK an rostfreien Stählen bei Raumtemperatur in

chloridhaltiger säurefreier Umgebung offenbar nur unter ungünstigen Voraussetzungen zu beobachten ist.

Zahlreiche langfristige Untersuchungen des SpRK-Verhaltens und des allgemeinen Korrosionsverhaltens nichtrostender Stähle in maritimer Umgebung haben zwar nachgewiesen⁵⁷⁾, daß diese Stähle geringfügige Lochkorrosion erleiden. SpRK ist jedoch weder im lösungsgeglühten, noch im kaltverformten oder geschweißten Zustand unter normaler Belastung durch chloridhaltige Luft beobachtet worden. Die einzigen Schäden werden aus der Nähe einer chemischen Fabrik berichtet, wo die Luft mit Chlor und Salzsäure verunreinigt war.

Weitere Untersuchungen⁵⁷⁾ weisen nach, daß die vom IfBt zugelassenen Stähle nach 15-jähriger Auslagerung weder in Industrie- noch in Meeresklima eine nennenswerte Einbuße ihrer Zugfestigkeit erleiden. Immer ist der Angriff der molybdänhaltigen Stähle aber geringer als der molybdänfreier CrNi-Stähle.

Bild 14 zeigt den Rißverlauf in einem Abhänger aus dem Schwimmbad Uster⁶⁴⁾. Die Schäden sind eindeutig infolge transkristalliner Spannungsrißkorrosion bei Temperaturen der Schwimmhallenluft entstanden. Sie war aber mit Lochfraß auf der Stangenoberfläche vergesellschaftet. Risse gingen sowohl von Löchern, aber auch von Bereichen aus, an denen keine Lochkorrosion zu beobachten war.

Der Schadensfall im Schweizer Schwimmbad zeigt, daß der Übergang zwischen chloridinduzierter und chloridsaurer Spannungsrißkorrosion fließend ist. Auch nach Bild 11 ist anzunehmen, daß in fortgeschrittenem Stadium aus chloridbewirkter Lochkorrosion in aggressiven chloridhaltigen Atmosphären auch "chloridsaure" SpRK werden kann, wenn Zugspannungen vorliegen. Nur sind die Beanspruchungen unter denen sich die hierfür nötigen korrosionschemischen Voraussetzungen entwickeln können, äußerst selten anzutreffen. Diese Entwicklung benötigt offenbar auch viel Zeit, die bei gezielten Untersuchungen meist nicht zur Verfügung steht. Daß Schwimmhallen ein Korrosionsklima besitzen, unter denen sich auch bei Raumtemperatur SpRK-fähige Elektrolyte entwickeln können, zeigt auch die metallographische Untersuchung der in 4.3.2.1 beschriebenen Abhänger aus CrNi-Stahl. Bild 12 zeigt an einem Quer-

schnitt dieses 5 Jahre alten Abhängers, daß auch hier schon Korrosionsangriffe entstanden sind, die über Lochkorrosion hinausgehen. Ausgehend von einer Lochkorrosionsstelle (rechts oben) ist hier ein Rißfeld entstanden, das aber eher interkristallin und entlang der Walztextur zu verlaufen scheint. Bild 13 zeigt, daß auch von der Schnittkante her rißförmige Angriffe entstehen.

5. Vergleichende Betrachtung der Werkstoffe

Es muß davon ausgegangen werden, daß die Luft von Schwimmhallen, deren Badewasser mit Chlor oder chlorhaltigen Mitteln desinfiziert werden, chlor- und chloridhaltig ist. In dieser Luft können unter korrosionsfördernden bauphysikalischen Bedingungen salzsaure, chloridreiche Oberflächenelektrolyte entstehen. Die an tragenden Metallbauteilen vorherrschenden lokalen Klimaverhältnisse sind schwer einschätzbar. Vielfach und insbesondere zwischen Hallen- und Unterdecke werden aber Bedingungen vorliegen, unter denen Elektrolytfilme auf den Bauteilen entstehen können, die in dem beschriebenen Sinne sehr korrosiv sind.

Das aggressive Elektrolytmilieu stimuliert den Korrosionsangriff aller bautechnisch interessanten Metalle. Jedoch sind die Korrosionsbeanspruchungen und Korrosionserscheinungen²²⁾ bei gleicher Korrosionsbelastung der Metalle sehr verschieden. Im Schwimmhallenklima werden die Querschnitte von Bauteilen aus unlegiertem Stahl und Aluminiumwerkstoffen gleichmäßig, aber kalkulierbar verringert. Die korrosionsbedingten Verluste können durch Korrosionszuschläge kompensiert oder durch Korrosionsschutzmaßnahmen verringert werden.

Nichtrostende Stähle reagieren gegenüber den beschriebenen Elektrolyten wesentlich unkalkulierbarer. Wenn sich aber Elektrolytfilme auf ihnen bilden, muß mit lokalen Angriffen gerechnet werden. Welche Ausmaße diese Angriffe annehmen, hängt ganz entscheidend von der Elektrolytzusammensetzung ab. Prinzipiell ist die Lochkorrosionsgefahr groß. Auch sie kann die Tragfähigkeit der Bauteile bereits erheblich mindern. Die Korrosionsgefahr scheint dort besonders groß zu sein, wo die chlorhaltige Hallenluft zwangsweise an den Bauteilen entlangströmt und wo die Temperaturen des Stahlteiles infolge der Kältebrückenwirkung unter der Hallenlufttemperatur liegt.

An Bauteilen aus nichtrostendem Stahl können sich langfristig auch Korrosionsbelastungen entwickeln, die Korrosionsrisse bewirken. Wie das Schweizer Unglück bewiesen hat, können solche Risse bei ungünstigen bautechnischen Gegebenheiten katastrophale Wirkungen haben.

Wegen der potentiellen Korrosionsgefahr, deren Höhe von schwer abzuschätzenden bauphysikalischen Bedingungen abhängt, bieten CrNi-Stähle gegenüber unlegierten Stählen und Aluminiumwerkstoffen keine Standsicherheitsvorteile. Auch kann der Korrosionszustand von Bauteilen aus nichtrostendem Stahl ohne Erfahrung und Laboruntersuchungen nur schwer beurteilt werden. Aus diesem Grunde sollte für tragende Teile einschließlich Verankerungs- und Verbindungselemente von Decken, Deckenbekleidungen, Unterdecken oder vergleichbare Bauteile innerhalb von Schwimmhallen keiner der zugelassenen⁴⁾ nichtrostenden Stähle verwendet werden, wenn durch Schäden an diesen Teilen Gefahr für die öffentliche Sicherheit droht und wenn die Schäden sich nicht durch leicht erkennbare und zunächst ungefährliche Veränderungen ankündigen. Ihr Einsatz sollte besonders dort unterbleiben, wo Bauteiltemperaturen zu erwarten sind, die zumindest zeitweise unter denen der Hallenluft liegen.

In allen anderen Fällen bestehen keine Bedenken gegen den Einsatz von nichtrostenden Stählen der zugelassenen Güten, wenn die Luftfeuchte in allen Hallenbereichen 60 - 70 % nicht überschreitet. In Schwimmhallen sollten wegen ihrer höheren Beständigkeit gegenüber chloridhaltiger Luft jedoch nur die molybdänhaltigen Sorten verwendet werden. Wird an den Bauteilen nicht geschweißt, ist der Stahl mit der Werkstoff Nr. 1.4401 gegenüber der Werkstoff Nr. 1.4571 wegen seiner etwas höheren Beständigkeit zu bevorzugen. Für Verbindungselemente sollte nur die Stahlgruppe A4 nach DIN 267, Teil 11 Verwendung finden. Da die Beständigkeit nichtrostender Stähle mit abnehmender Rauigkeit zunimmt, muß die Oberflächenbeschaffenheit der verarbeiteten Bauteile mindestens der Ausführungsart h oder IIIb nach DIN 77440⁴⁶⁾ entsprechen, also glatt und blank sein.

Als Alternative für den Einsatzbereich, in dem die zugelassenen nichtrostenden Stähle einer zu großen Korrosionsgefährdung aus-

gesetzt sind, ist der Einsatz von Metallen zweckmäßiger, die zwar nicht beständig sind, deren Schädigung aber abschätzbar und prüfbar ist. Selbstverständlich sind auch hochlegierte Stähle verfügbar, die in dem Schwimmbadmilieu wesentlich beständiger sind als die zugelassenen Stähle⁴⁾. Ihr Einsatz ist zwar kostspielig, andererseits bieten sie aber den Vorteil längster Lebenserwartung und völliger Wartungsfreiheit.

5.1 Unlegierter Stahl und Aluminium

Zu den erstgenannten Werkstoffen gehören der ungeschützte und feuerverzinkte unlegierte Stahl und die im Bauwesen brauchbaren, SpRK-unempfindlichen Aluminiumwerkstoffe. Sie könnten überall dort sogar ohne einen zusätzlichen Schutz verwendet werden, wo nicht mit häufiger Schwitzwasserbildung zu rechnen, und der optische Eindruck der korrodierten Teile ohne Bedeutung ist. Ihr ungeschützter Einsatz setzt jedoch die Berücksichtigung eines Korrosionszuschlags zur statisch erforderlichen Materialdicke voraus. Für die Abschätzung der Lebensdauer werden folgende Werte vorgeschlagen:

- Stahl, unlegiert und ungeschützt: ca. 0,05 mm/Jahr
- Aluminium : ca. 0,02 mm/Jahr
- verzinkter Stahl,
Lebensdauer der Zinkschichtdicke
s (einseitig) : $\frac{s \text{ mm}}{0,005 \text{ mm/a}}$

Die Zinkschichtdicke der feuerverzinkten Teile sollte jeweils den höchsten Werten der einschlägigen Normen^{26,65-66)} entsprechen. Gegebenenfalls sind mit dem Lieferanten besonders dicke Schichten zu vereinbaren. Verbindungselemente müssen nach DIN 267, Teil 10⁷¹⁾ verzinkt sein.

Die Erfahrung hat gezeigt, daß bei günstigen Lüftungstechnischen und anderen bauphysikalischen Voraussetzungen auch wesentlich niedrigere Korrosionsgeschwindigkeiten vorliegen können. Die vorgeschlagenen Werte sollten aber überall dort berücksichtigt werden, wo die tragenden Teile unzugänglich sind und ihr Korrosionszustand nicht prüfbar ist.

Ist die Korrosionsbelastung der tragenden Bauteile zu hoch oder nicht abschätzbar, oder haben sie auch ästhetische Funktion,

müssen Stahlteile nach DIN 55928, Teil 5⁶⁹⁾ oder Teil 8⁶⁸⁾ geschützt werden. Wegen des zu erwartenden korrosiven Korrosionsmilieus sind die in DIN 18168, Teil 1⁶⁷⁾ geforderten Ansprüche an den Korrosionsschutz von tragenden Bauteilen in Schwimmhallen selbst zu gering, wenn von den Teilen eine Funktionsdauer erwartet wird, die der Lebenserwartung des Bauwerks entsprechen soll. Für den Korrosionsschutz dieser Teile sind deshalb die Maßstäbe anzusetzen, die in DIN 18168, Teil 1 für Bauteile mit besonderer korrosionsfördernder Belastung gelten.

Ein Korrosionsschutzsystem nach DIN 55928 sollte der Korrosionsschutzklasse III (Teil 8) entsprechen oder chemischer Belastung (Teil 5) gewachsen sein. Bei der Wahl eines Duplex-Schutzsystems aus Verzinkung und organischem Überzug sind die Hinweise auf die Oberflächenvorbereitung nach DIN 55928, Teil 4⁷²⁾, und die allgemeinen Hinweise im Merkblatt 329⁷³⁾ der Beratungsstelle für Stahlverwendung zu beachten..

Auch Aluminiumbauteile müssen bei hoher Korrosionsbelastung in der Schwimmhalle beschichtet oder mit einer anodisch erzeugten, verdichteten Oxidschicht von mindestens 20 µm versehen werden. Hinweise hierzu enthält DIN 4113, Teil 1⁷⁰⁾. Anstriche und Bandbeschichtungen aus Einbrenn-Lackfarben haben eine besonders gute Korrosionsschutzwirkung⁴⁰⁾.

Die Bedenken hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit der zugelassenen nichtrostenden Stähle sind auch auf Dübel und Setzbolzen übertragbar, wie sie zur Verankerung der Unterkonstruktion von Unterdecken in Betondecken oft verwendet werden. Sie sind besonders dann gefährdet, wenn die Hallenluft Zugang zum Innern des Dübels hat. Keine Gefahr besteht hingegen, wenn der Dübel nach unten verschlossen ist. Durch Beton "gefilterte" Hallenluft ist für Dübel aus nichtrostendem Stahl ungefährlich, da sie keine korrosiven Stoffe wie Chlor oder Chlorverbindungen mehr enthält. Feuchtigkeit ohne diese Stimulatoren schadet nichtrostenden Stählen nicht. Verzinkte Stahldübel werden hingegen korrodiert.

Es gibt bisher keine korrosionsbeständige zugelassene Dübelalternative mit ausreichender Beständigkeit gegenüber chlorhaltiger Schwimmhallenluft oder ohne andere Nachteile. Aus

diesem Grunde wird zunächst vorgeschlagen, weiterhin Dübel aus dem Werkstoff A4 zu verwenden, und den Dübel nach dem Setzen mit dauerelastischer Korrosionsschutzmasse zu versiegeln. Hierfür sind Produkte z. B. auf Vaseline-, Petrolatum- oder Bitumenbasis u. a. geeignet, die nichtrostende Stähle nicht schädigen. Da diese Produkte bei satter Verfüllung beim Einführen von Schrauben oder Bolzen teilweise wieder austreten, schützen sie auch Unterlegscheiben etc.

5.2 Höherlegierte Stähle und Legierungen

Außer den zugelassenen nichtrostenden Stählen gibt es noch eine Reihe anderer, mit höherer Korrosionsbeständigkeit gegenüber chlor- und chloridhaltigen Medien. Die rein ferritischen Chrom- und die ferritisch-austenitischen Stähle sind zwar wesentlich beständiger gegenüber SpRK in chloridreichen Medien. Die Beständigkeit gegenüber den übrigen Korrosionsarten ist aber geringer (Ferrite) oder nur gleichwertig (Ferrit-Austenit). Sie bilden daher keine geeignete Alternative zu den zugelassenen Stählen.

Neuere Austenitisch-ferritische Stähle versprechen neben guter Beständigkeit gegenüber chloridinduzierter SpRK auch eine ausgezeichnete Lochkorrosionsbeständigkeit. Auch andere Schwächen der älteren Duplex-Stähle sollen behoben sein. Als Beispiel sei der Stahl X2CrNiMoN 22 5 mit der Werkstoff Nr. 1.4462 genannt. Er soll gut verarbeitbar und schweißsicher sein^{76,77}).

Eine wesentliche Verbesserung der Lochkorrosions- und SpRK-Beständigkeit austenitischer Stähle ist durch Erhöhen des Molybdängehaltes gelungen. Zu diesen Stählen gehört der Stahl X 3 CrNiMoN17 13 5 mit 4 - 5 % Mo und der Werkstoff Nr. 1.4439 (DIN 17440), der heute zu den Standard-Stählen im chemischen Apparatebau gehört^{74,76}). Weitere Stähle mit noch höherem Mo-Gehalt werden entwickelt.

Die Korrosionsbeständigkeit der ferritischen Chrom-Stähle konnte durch die Entwicklung der Superferrite wesentlich verbessert werden. Die hochreinen CrMo-Stähle mit der Werkstoff Nr. 1.4521 und 1.4522 weisen zwar eine hohe Beständigkeit gegen chloridinduzierte SpRK und eine dem Werkstoff Nr. 1.4401 gleichwertige Lochkorrosionsresistenz auf. Es ist jedoch fraglich, ob seine Beständigkeit in verdünnter Salzsäure als Schwimmballenelektrolyt ausreicht.

Größere Aussicht auf erfolgreichen Einsatz bieten die ferritischen hochreinen Stähle mit höherem Chromgehalt, z. B. der Stahl X 1 CrNiMoNb 28 4 2, Werkstoff Nr. 1.4575. Auch bei diesen Stählen geht aber die Entwicklung weiter⁷⁸⁻⁸²⁾.

Höchste Beständigkeit gegenüber Lochfraß und SpRK bieten einige Nickel-Knetlegierungen mit hohem Molybdängehalt nach DIN 17444⁷⁵⁾. Hierzu gehören die Legierungen NiMo16Cr16Ti, Werkstoff Nr. 2.4610, und NiCr22Mo9Nb, Werkstoff Nr. 2.4856. Hinter diesen Kennzeichnungen verbergen sich die eher unter dem Herstellernamen bekannten Legierungen Hastelloy C 4 und Inconel 625. Sie sind beide als Bänder, Bleche und Stangenmaterial lieferbar, lassen sich auch zu Dübeln oder anderen Befestigungsmitteln verarbeiten und sind schweißbar. Gegen ihre Anwendung für Schwimmhallenbauteile spricht ihr hoher Preis, aber auch ihre Verfügbarkeit in den benötigten Abmessungen und Formen. Diese Einschränkung gilt auch für die übrigen alternativen nichtrostenden Stähle.

Zusammenfassung

Im Mai 1985 ist die Stahlbetonunterdecke einer Schwimmhalle in der Schweiz eingestürzt. Sie war an Abhängern aus Cr/Ni-Stahl aufgehängt. Schadensursache war transkristalline Spannungsrißkorrosion an den Abhängern. Nichtrostende Stähle dieser Art werden auch in Deutschland für diesen Einsatzbereich verwendet. Aus diesem Grunde sollten die Ursachen für den Korrosionsschaden, Werkstoffalternativen und Korrosionsschutzmöglichkeiten erörtert werden.

In Schwimmhallen mit gechlortem Badewasser enthält die Luft Chlor und Chlorverbindungen. Dieser Gehalt ist zwar gering, er beeinflusst aber die Zusammensetzung von Wasserfilmen, die sich auf Metallteilen in der Halle bilden können. Schwimmhallenluft ist zudem feucht. Der Feuchtigkeitsgehalt der Luft kann sehr unterschiedlich sein. Je nach Höhe des Wasserdampfgehaltes der Hallenluft und den bauphysikalischen Randbedingungen können sich ab einer relativen Feuchte von 60 - 70 % Elektrolytfilme auf Metallteilen bilden. Ihre Dicke nimmt mit steigender Feuchtigkeit zu. Bei Taupunktüberschreitung bildet sich sogar tropfbares Wasser, Schwitz- oder Kondenswasser genannt.

In Schwimmhallenatmosphären enthält der Elektrolytfilm auf Metalloberflächen außer gelöstem SO_2 aus der Außenluft auch gelöstes Chlor aus der Hallenluft. Beide bilden Säuren, nämlich Schwefel-Salz- und hypochlorige Säure im Elektrolytfilm. An ungestörten Oberflächen kann sich durch Eindicken im Laufe der Zeit ein saurer, stark salzhaltiger Feuchtigkeitsfilm entwickeln, der oxidierende Eigenschaften besitzt. Sein Salzgehalt wird vorwiegend durch Chloride bestimmt, die aber nicht nur von gelöstem Chlor, sondern auch vom Salzgehalt der Schwimmbadluft stammen können. Messungen an Korrosionsprodukten von Abhängern aus Aluminium haben bis 20 % Cl nachgewiesen.

Salze sind nicht nur hygroskopisch, sondern auch korrosiv gegenüber metallischen Werkstoffen. Die Korrosivität von Wasserfilmen in Schwimmhallen entspricht nach ihrem Salzgehalt dem maritimer Umgebung. Sie wird jedoch durch den Anteil an Säure (HCl) und oxidierend wirkenden Bestandteilen (HOCl) gegenüber Meeresatmosphäre verschärft.

Bei relativen Feuchten unter ca. 65 % ist die Korrosionsgefahr für metallische Bauteile gering. Darüber bilden sich aber korrosive Wasserfilme mit unterschiedlicher Auswirkung auf die für tragende Teile in Schwimmhallen verwendeten Metalle unlegierter Stahl, verzinkter Stahl, Aluminiumwerkstoffe und nichtrostender Stahl.

Unlegierter Stahl wird in feuchter Schwimmhallenluft wie in Industrieluft überwiegend flächenförmig mit leichter Muldenstruktur angegriffen. Die Hallenatmosphärien haben vorwiegend nur beschleunigenden Einfluß. Die aus dem Chlorgehalt der Luft resultierende Salzsäure hat eine Multiplikatorwirkung vergleichbar mit der aus SO_2 gebildeten Schwefelsäure.

Je nach Feuchtigkeitsangebot rostet unlegierter Stahl mit unterschiedlicher Abtragsrate. Angriffe mit sehr lokaler Wirkung wie Spannungsrißkorrosion oder Lochfraß sind aber nicht zu erwarten. Rost ist meist unerwünscht. Aus diesem Grunde wird Stahl selten ungeschützt eingesetzt.

Ein häufig anzutreffendes Korrosionsschutzverfahren ist die Verzinkung. Je nach Aufbringungsverfahren werden unterschiedliche

Zinkschichtdicken erzeugt. Mit der Feuerverzinkung werden die dicksten Schichten erreicht. Sie betragen bei der Stückverzinkung 50 - 150 μm , bei der Bandverzinkung 15 - 30 μm . Galvanisch aufgebraachte Schichten sind in Einzelbädern erzeugt 5 - 25 μm dick, im Durchlauf hergestellte Schichten sind nur 2,5 - 7,5 μm stark.

Zinkschichten bilden mit den Bestandteilen der Luft schützende Deckschichten, die die Korrosionsgeschwindigkeit stark vermindern. Hierauf beruht ihre Schutzwirkung. Die kathodische Schutzwirkung gegenüber Stahl ist bei atmosphärischer Beanspruchung ohne große Bedeutung. Zinkschichten werden auch in Hallenbädern überwiegend gleichförmig korrodiert. Ihre Schutzdauer ist daher linear von ihrer Schichtdicke abhängig. Verzinkte Teile in Schwimmhallen sollten daher immer feuerverzinkt sein und die größtmögliche Schichtdicke erhalten. Mit Lochfraß oder Spannungsrißkorrosion ist an verzinkten Stahlteilen normaler Festigkeit nicht zu rechnen.

Hohe Abtragsraten sind bei verzinktem Stahl lediglich unter Tauwassereinfluß zu erwarten. Unter Wassertropfen bilden sich keine schützenden Schichten. Der Chlorgehalt der Hallenluft erhöht die Korrosivität des Schwitzwassers. Unter diesen Bedingungen muß auch die Zinkschicht noch durch organische Überzüge (Lack) geschützt werden.

Aluminiumwerkstoffe sind in Schwimmhallen seltener anzutreffen. Auch sie werden zunächst stark angegriffen. Die entstehenden Korrosionsprodukte bilden dann aber eine unansehnliche graue Kruste mit schützender Wirkung. Zwar erfolgt der Angriff lochfraßförmig. Die Löcher sind jedoch so dicht, daß ihre Auswirkung mit einer flächenförmigen Querschnittsveränderung vergleichbar ist. Untersuchungen in Meeresklima und eigene Untersuchungen an Teilen aus Schwimmhallen haben aber nur geringe Eindringraten des Angriffs nachgewiesen. Entsprechend gering ist auch langfristig die Einbuße an mechanischer Festigkeit.

Einige Aluminiumlegierungen sind unter Chlorideinwirkung empfindlich für Spannungsrißkorrosion. Diese Legierungen sind im Bauwesen unüblich, sollten aber bei korrosiver Beanspruchung erst recht nicht verwendet werden. Gleiches gilt für die kupferhaltigen Legierungen.

Wie Zink ist auch der Aluminiumwerkstoff bei starker Schwitzwasserbelastung nicht ausreichend korrosionsbeständig und muß zusätzlich geschützt werden. Mit diesem hat es auch die Empfindlichkeit gegenüber edleren Werkstoffen gemeinsam. Wegen der Kontaktkorrosion sollten Verbindungen mit ungeschütztem Stahl, nichtrostendem Stahl und vor allem Kupferwerkstoffen deshalb vermieden werden.

Von den nichtrostenden Stählen haben im Bauwesen bisher nur die ferritischen Chromstähle, vor allem aber die austenitischen Cr/Ni-Stähle größere Bedeutung. Die gängigen Chrom-Nickelstähle mit und ohne Molybdän sind vom IfBt für das Bauwesen zugelassen.

Während die in Schwimmhallenatmosphäre auf Metallteilen entstehenden Chlorsäuren durch die vorgenannten Metalle immer wieder chemisch abgebunden und so unschädlich gemacht werden, können sie sich auf nichtrostendem Stahl zunächst anreichern. Unter entsprechenden bauphysikalischen Voraussetzungen wird der Elektrolytfilm deshalb immer saurer und chloridreicher.

In neutralen Chloridlösungen von Raumtemperatur sind besonders die ferritischen Chrom-Stähle, aber auch die häufiger verwendeten austenitischen Cr/Ni-Stähle gegenüber Spannungsrißkorrosion sehr unempfindlich. Bei Chloridanreicherung ist aber mit Loch- und Spaltkorrosion zu rechnen. Austenite sind diesen Korrosionsarten gegenüber beständiger als die Ferrite.

Untersuchungen aus den letzten Jahren haben aber nachgewiesen, daß in saurem chloridreichem Milieu die zugelassenen Cr/Ni-Stähle auch bei Raumtemperatur transkristalline Spannungsrißkorrosion erleiden können. Wie auch die Praxis erwiesen hat, sind diese Stähle im Schwimmhalleneinsatz nicht nur durch Lochkorrosion, sondern auch durch Korrosionsrisse gefährdet. Ob solche Schäden entstehen, hängt von vielen, auch bauphysikalischen Einflüssen ab. Prinzipiell muß eine derartige Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften tragender Teile aber ins Kalkül gezogen werden. Konventionelle nichtrostende Stähle bieten den unlegierten Stählen und vielen Aluminiumlegierungen gegenüber unter Schwimmhallenbeanspruchung daher keine Standsicherheitsvorteile. Wegen der Möglichkeit spontanen Versagens ist eher vom Gegenteil auszugehen.

Nichtrostende Stähle reagieren in Schwimmhallenatmosphäre also wesentlich unberechenbarer als unlegierter Stahl, auch verzinkt, und Aluminium. Wo es auf den optischen Eindruck nicht ankommt, können diese Werkstoffe daher mit einem Korrosionszuschlag zum statisch erforderlichen Querschnitt verwendet werden. Schutzverfahren für diese Werkstoffe werden in DIN 55928 für Stahl und in DIN 4113 für das Aluminium beschrieben.

Auch bei den nichtrostenden Stählen ist die Entwicklung nicht stehen geblieben. Neuere Stähle versprechen eine wesentlich höhere Beständigkeit gegenüber chloridinduzierter Spannungsrißkorrosion und Lochfraß und auch eine ausreichende Sicherheit gegen interkristalline Korrosion nach dem Schweißen. Aus den verschiedenen Gruppen seien nur einige genannt:

- austenitisch-ferritischer Stahl X 2 CrNiMoN 22 5
(W. Nr. 1.4462)
- superferritischer Stahl X 1 CrNiMoNb 28 4 2
(W. Nr. 1.4575)
- austenitischer Stahl X 3 CrNiMoN 17 13 5
(W. Nr. 1.4439)

Der letztgenannte gehört im chemischen Apparatebau zu den Standard-Stählen. Bei ausreichendem Bedarf werden die genannten Stähle auch in den im Schwimmhallenbau erforderlichen Erzeugnisformen zur Verfügung stehen.

Höchste Beständigkeit gegenüber jeglichen Korrosionsangriffen bieten einige Nickelbasis-Legierungen wie NiMo16Cr16Ti (W. Nr. 2.4610) und NiCr22Mo9Nb (W. Nr. 2.4856), besser bekannt unter den Herstellerbezeichnungen Hastelloy C 4 und Inconel 625. Ihre Verfügbarkeit in geeigneten Erzeugnisformen wird wie bei den neuen rostfreien Stählen durch den Bedarf bestimmt. Der Einsatz dieser Legierungen in Schwimmhallen ist zwar teuer, sie sind aber absolut sicher und wartungsfrei.

Literatur

- 1) Schweizer Ingenieur und Architekt, 1985, H. 21, S. 509/10
- 2) Schweizer Ingenieur und Architekt, 1985, H. 23, S. 566/67
- 3) DIN 50930, Teil 4: Korrosionsverhalten von metallischen Werkstoffen gegenüber Wasser - Beurteilungsmaßstäbe für nichtrostende Stähle, Dezember 1980
- 4) Zulassungsbescheid für nichtrostende Stähle, Institut für Bautechnik Berlin, ZulassungsNr. Z 30.1-44 vom 31.1.1984, Erstzulassung 1974
- 5) DECHEMA Werkstoff-Tabelle, Hrsgb. Deutsche Gesellschaft für chemisches Apparatewesen e. V., Verlag Chemie, Weinheim
- 6) VDI-Richtlinie 2089, Blatt 1: Heizung, Raumluftechnik und Brauchwasserbereitung in Hallenbädern, Dezember 1978
Blatt 2: Wasseraufbereitung für Schwimmbeckenwasser, Januar 1983
- 7) DIN 19643: Aufbereitung und Desinfektion von Schwimm- und Badebeckenwasser, April 1984
- 8) Hollemann, A. F. u. Wiberg, E.: Lehrbuch der anorganischen Chemie, W. de Gruyter, Berlin 1985
- 9) wie 5), Natriumhypochlorit
- 10) Herschmann, W.: Archiv des Badewesens, 35 (198) 4, S. 114/119
- 11) Jessen, H. J., Frühholz, R. und H. Kahl: Zeitschrift Ges. Hygiene 28 (1982) 2, S. 82/84
- 12) Lahmann, E.: Luftverunreinigungen in Berlin (West), Der Senator für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin, 1984
- 13) Roeske, W.: Schwimmbeckenwasser-Anforderungen-Aufbereitung-Untersuchung, Verlag Otto Haase, Lübeck, 1980
- 14) Eichelsdörfer, E., Slovak, J., Dirnagel, K. u. K. Schmid: Archiv des Badewesens 29 (1976) 1, S. 19 - 13
- 15) Kurzmann, E.: Der Sanitär-Installateur und Heizungsbauer (1970) 5, S. 111 - 119

- 16) Fabian , D.: Bäderbauten, Krammer Verlag, Düsseldorf, 1979
- 17) Barton, K.: Schutz gegen atmosphärische Korrosion, Verlag Chemie, Weinheim, 1973
- 18) Theiler, F., EMPA Schweiz, private Mitteilung
- 19) Uhlig, H. H. u. Winston Revie, R.: Corrosion and Corrosion Control, John Wiley and Sons, N. Y. 1985
- 20) Evans, U. R.: The Corrosion and Oxidation of Metals, 2. Ergänzungsbänd, Edwald Arnold, London, 1976
- 21) Shreir, L. L.: Corrosion, Newness-Butterworth, London, 1976
- 22) DIN 50900, Korrosion der Metalle, Begriffe. Teil 1 - 3 1982 - 1985
- 23) Landolt-Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen 6. Auflage, Bd. II/2 b, Springer Verlag, Berlin, 1962
- 24) Wüstenberg, G.: Temporärer Korrosionsschutz von Ausrüstungen, DECHEMA, Frankfurt, 1982
- 25) Korrosionsschutz mit Zink: Hrsgb. Zinkberatung e.V., Düsseldorf, 1980
- 26) DIN 50976: Durch Feuerverzinken auf Einzelteile aufgebraachte Überzüge, März 1980
- 27) Johnen, H.: Zink-Taschenbuch, Hrsgb. Zinkberatung e.V., Düsseldorf, Metall-Verlag, Berlin, 1981
- 28) Johnen, H.: Zink für Stahl, Hrsgb. Zinkberatung e.V. Düsseldorf, 1984
- 29) Schikorr, G.: Korrosionsverhalten von Zink, Band 1, Verhalten von Zink in der Atmosphäre, Metallverlag, Berlin, 19
- 30) VDI-Richtlinie 3822, Blatt 3, Schadensanalyse - Schäden durch Korrosion in wässrigen Medien, Februar 1984
- 31) British Standard PD 6484: 1979: Commentary on corrosion at bimetallic contacts and its alleviation
- 32) Zink statt Rost, Beratung Feuerverzinken, 2. Auflage, Hagen, 1983

- 33) Merkblatt 359: Feuerverzinkungsgerechtes Konstruieren im Stahlbau, Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf, 6. Auflage, 1981
- 34) Feuerverzinkte Schrauben, Muttern, Scheiben, Federringe, Beratung Feuerverzinken, Hagen
- 35) Merkblatt 367: Schweißen von stückverzinktem Stahl, Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf, 3. Auflage, 1979
- 36) Merkblatt 259: Korrosionsschutz im Stahlbau, Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf, 1982
- 37) Merkblatt 322: Schrauben im Stahlbau, Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf, 1983
- 38) Stahlbauarbeitshilfe 1.4, Korrosionsschutz-Feuerverzinken Deutscher Stahlbau-Verband DSTV, Köln, 6. Auflage, 1983
- 39) Merkblatt 400: Korrosionsverhalten von feuerverzinktem Stahl, Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf, 4. Auflage, 1983
- 40) Aluminium-Taschenbuch, Hrsgb. Aluminium-Zentrale, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 14. Auflage, 1983
- 41) Oelsner, G.: Galvanotechnik 73 (1982) 3, S. 216 - 222
- 42) wie 5), Atmosphäre, Blatt 7, 1976
- 43) Metals Handbook, 9. Auflage, Band 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals, American Society for Metals, 1979
- 44) Godard, H. P., Jepson, W. B., Bothwell, M. R. and Kane, R. L.: The corrosion of light metals, John Wiley and Sons, N. Y., 1967
- 45) DIN 55928, Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichten und Überzüge, T. 1 - 8, 1976 - 1982
- 46) DIN 17440, Nichtrostende Stähle - Technische Lieferbedingungen, Juli 1985
- 47) DIN 50930, Korrosionsverhalten von metallischen Werkstoffen gegenüber Wasser, Teil 1 - 5, Dezember 1980

- 48) Herbsleb, G., Pfeiffer, B. und Ternes, H.: Werkstoffe und Korrosion 30 (1979), S. 322 - 340
- 49) Meyburg, R. J. L., Krougman, J. M. und Ijsseling: Corrosion Science 23 (1983) 9, S. 943 - 957
- 50) Bilogan, K.: Corrosion - NACE, 39 (1983) 12, S. 508 - 514
- 51) Torchio, S.: Corrosion Science, 20 (1980), S. 555 - 561
- 52) Maier, I. A., Manfredi, C. u. Galvele, J. R.: Corrosion Science 25 (1985) 1, S. 15 - 34
- 53) DIN 50929, Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung, Teil 1 - 3, September 1985
- 54) Bianchi, G., Mazza, F. und Torchio, S.: Corrosion Science 13 (1973), S. 165 - 173
- 55) Herbsleb, G. u. Pfeiffer, B.: Werkstoffe und Korrosion 35 (1984), S. 254 - 266
- 56) Scheidegger, R. und Müller, R.O.: Werkstoffe und Korrosion 31 (1980), S. 387 - 393
- 57) Ailor, W. H.: Atmospheric Corrosion, John Wiley and Sons, N. Y., 1982
- 58) DIN 267, Mechanische Verbindungselemente - Technische Lieferbedingungen - Teile aus rost- und säurebeständigen Stählen, Teil 1, Januar 1980
- 59) Rahmel, A. und Schwenk, W.: Korrosion und Korrosionsschutz von Stählen, Verlag Chemie, Weinheim, 1977
- 60) Kaesche, H.: Die Korrosion der Metalle, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1979
- 61) Szklarska-Smialowska, S. in Localized Corrosion NACE-3, NACE, Houston Tx, 1974
- 62) Speidel, M. O.: Metallurgical Transactions A 12 A (1981) 5, S. 779 - 789
- 63) DIN 50959, Hinweise auf das Korrosionsverhalten galvanischer

Überzüge auf Eisenwerkstoffen unter verschiedenen Klimabeanforderungen, April 1982

- 64) Theiler, F.: EMPA-Dübendorf, Schweiz, hat der BAM Proben zur Verfügung gestellt
- 65) DIN 1548, Zinküberzüge auf runden Stahldrähten, Januar 1979
- 66) DIN 17162, Flachzeug aus Stahl, feuerverzinktes Band und Blech, Teil 1 - September 1977; Teil 2, September 1980
- 67) DIN 18168, Teil 1: Leichte Deckenbekleidungen und Unterdecken - Anforderung an die Ausführung, Oktober 1981
- 68) DIN 55928, Teil 8: Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungen und Überzüge - Korrosionsschutz von tragenden dünnwandigen Bauteilen, März 1980
- 69) DIN 55928, wie 68), Beschichtungsstoffe und Schutzsysteme, Teil 5, März 1980
- 70) DIN 4113, Aluminiumkonstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung - Berechnung und Durchbildung, Teil 1, Mai 1980
- 71) DIN 267, Metallische Verbindungselemente - Technische Lieferbedingungen - Feuerverzinkte Teile, Teil 10, März 1977
- 72) DIN 55928, wie 68), Vorbereitung und Prüfung von Oberflächen, Teil 4, Januar 1977
- 73) Merkblatt 329: Feuerverzinken + Beschichten = Duplex-System, 6. Auflage, 1981
- 74) Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie, 4. Auflage, Band 22, Verlag Chemie, Weinheim, 1983
- 75) DIN 17744, Nickel-Knetlegierungen mit Molybdän und Chrom, Februar 1983
- 76) Gräfen, H.: Chem. Ing. Technik 54 (1982) 2, S. 108 - 119
- 77) Wessling, W., H. E. Bork u. W. Fuchs: Z. Werkstofftechnik 4 (1973) 186 - 195
- 78) Oppenheim, R.: Thyssen Edelstahl Techn. Ber. 8 (1982) 2, S. 97 - 110

- 79) Kiesheyer, H., wie 78), S. 111 - 114
- 80) Thyssen Edelstahl, Techn. Ber. 5 (1979) 41, Sonderheft
Remanit 4575
- 81) Horn, E. M., D. Kuron u. H. Gräfen: Z. Werkstofftechnik
8 (1977) S. 37 - 55
- 82) wie 74), Band 22, Stähle

BILDANHANG

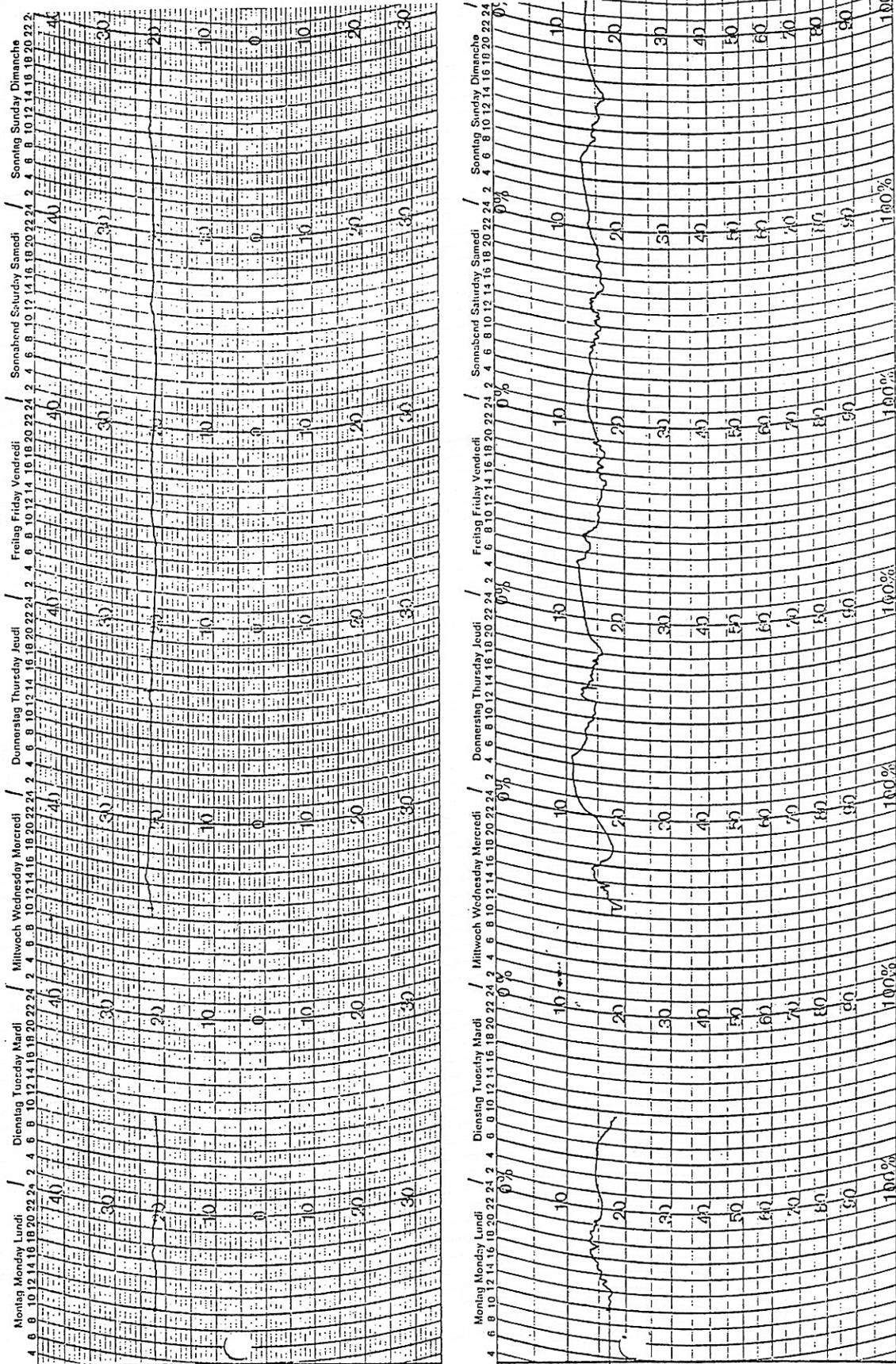


Bild 1: Temperatur und relative Feuchte im Zwischendeckenbereich einer Schwimmhalle, Luftzufuhr

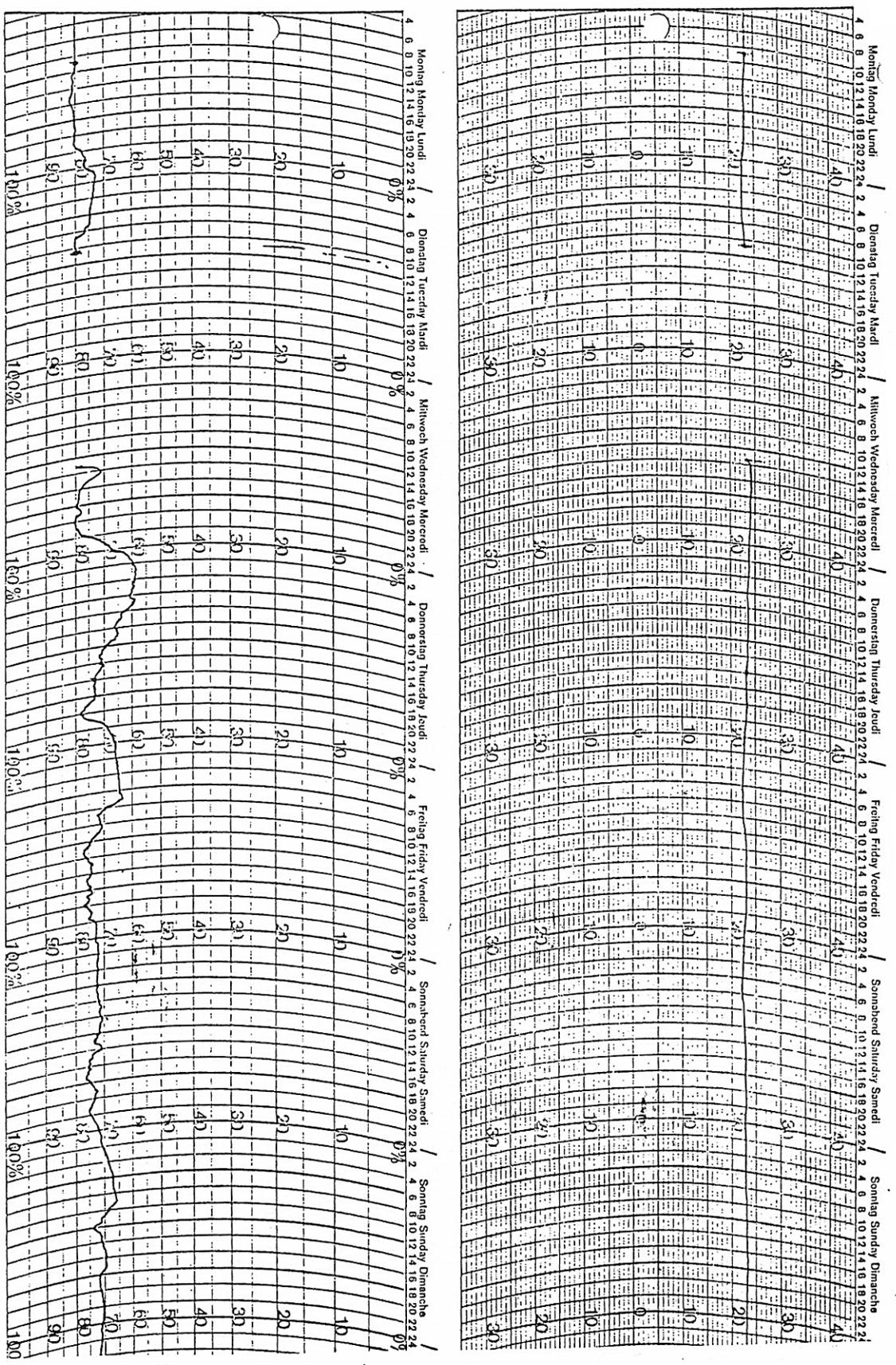


Bild 2: Wie Bild 1, gegenüberliegender Bereich

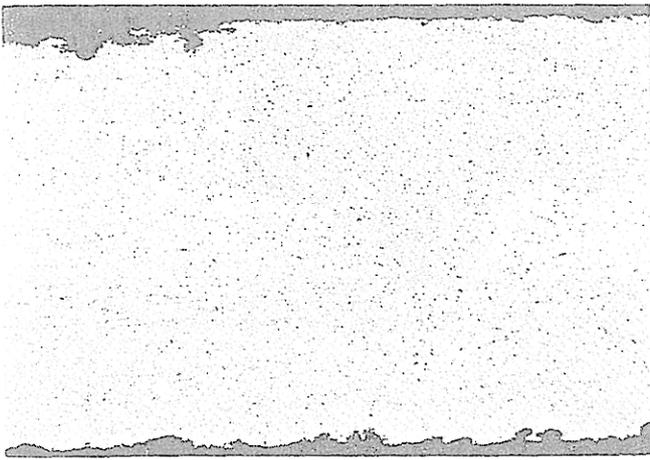


Bild 3: (M4002) Querschnitt durch einen Abhänger aus Aluminium nach 15-jähriger Bewitterung in Schwimmhallenluft, $v = 50 : 1$

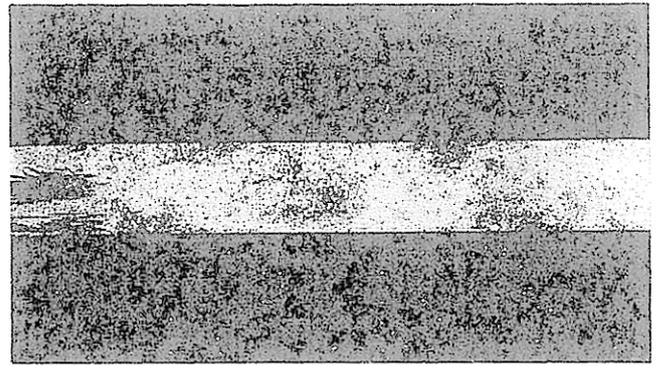


Bild 4: (R 5750/7) Oberfläche eines Abhängers aus nichtrostendem Stahl, 1.4301, nach 5-jähriger Bewitterung in einer Schwimmhalle oberhalb einer Unterdecke

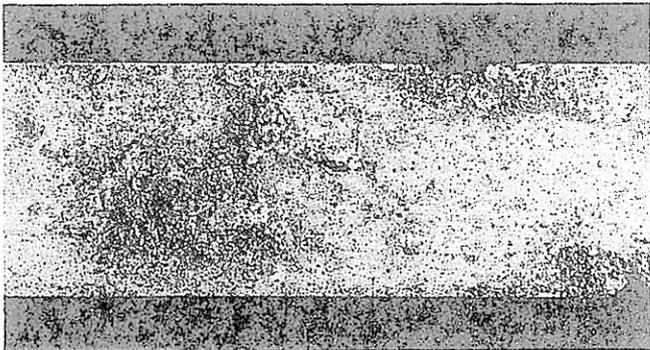


Bild 5: (R 5750/3) Lochkorrosion auf den Abhängern aus 1.4301

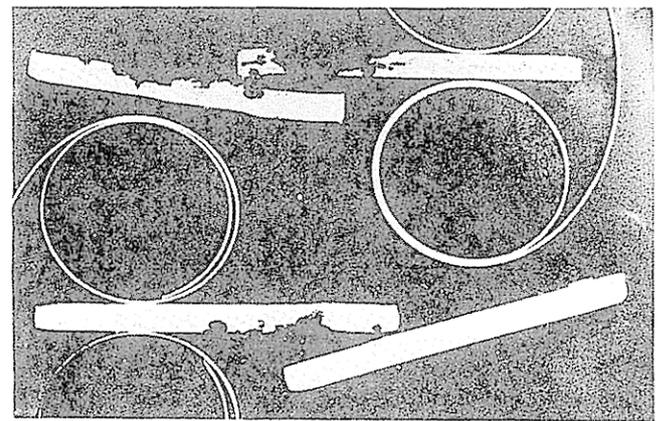


Bild 6: (F 17/1389) Querschleife durch Abhänger aus nichtrostendem Stahl (Bild 4) mit Lochkorrosion (auskorrodiert)

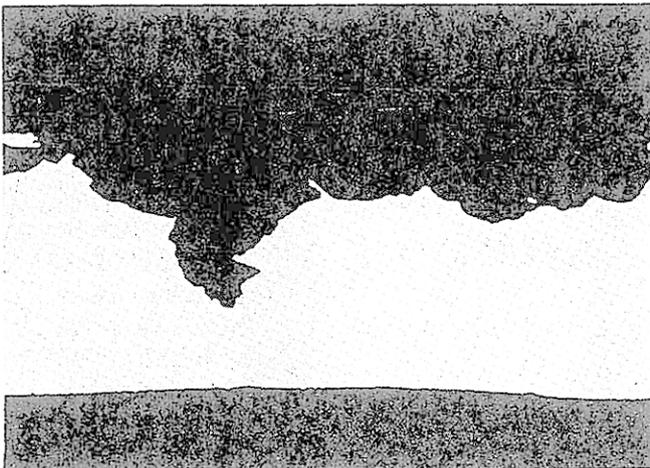


Bild 7: (M3954) Auskorrodierte Lochkorrosion an Abhängern aus nichtrostendem Stahl (s. Bild 4), $v = 62 : 1$

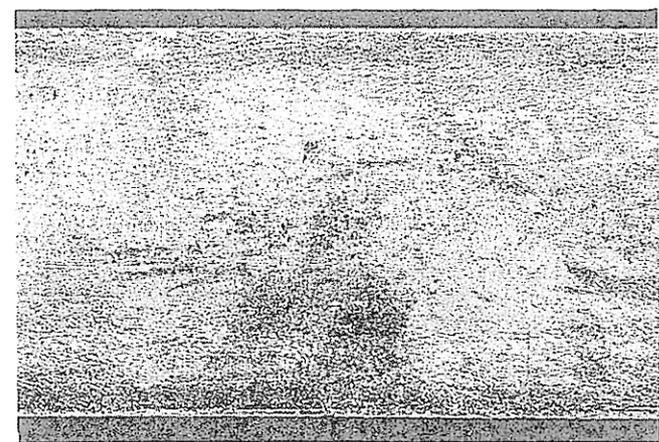


Bild 8: (11865) Rostflecken auf einem Abhänger aus 1.4571 nach 10-jähriger Bewitterung in einer Schwimmhalle

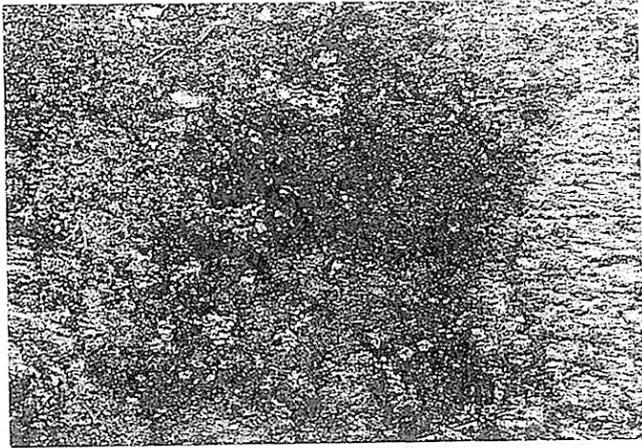


Bild 9: (11866) Detailansicht des Rostfleckes mit Lochkorrosion



Bild 10:
(M 4017) Lochkorrosion im Abhänger im Querschliff
 $v = 100 : 1$

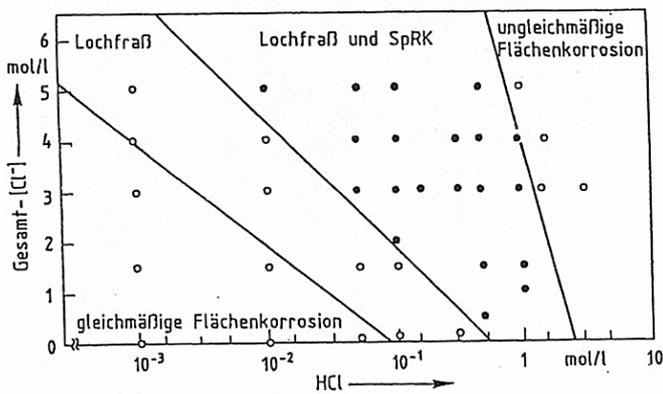


Bild 11: Erscheinungsformen der Korrosion von CrNi-Stahl als Funktion von Salzsäure- und Gesamtchloridgehalt bei Raumtemperatur (51)



Bild 12: (M4006) Korrosionsangriff eines Abhängers aus 1.4301 nach 5-jähriger Bewitterung in einer Schwimmhalle oberhalb einer Unterdecke, $v = 130 : 1$



Bild 13: (M4005) Korrosionsangriff an der Schnittkante eines Abhängers aus der Schwimmhallendecke, $v = 130 : 1$

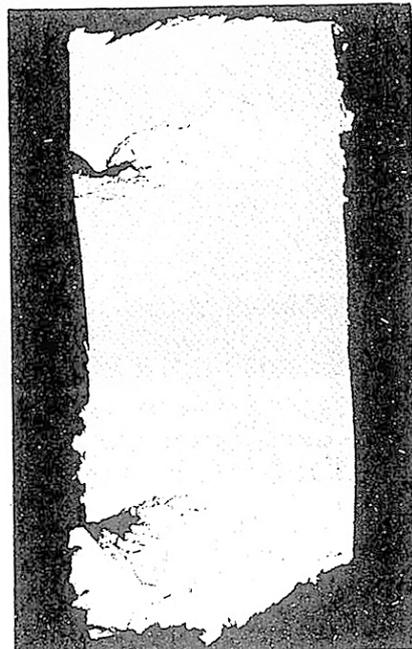


Bild 14:
(F 57/1393) Transkristalline SpRK an einem Abhänger aus nichtrostendem Stahl (1.4301) nach 13-jähriger Bewitterung in einer Schwimmhalle (64),
 $v = 4,5 : 1$

Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/September 1968

Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/Juli 1970 (vergriffen)

Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern
von Dr.-Ing. Götz Andreae

Nr. 3/September 1970 (vergriffen)

Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile
von Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 4/Dezember 1970 (vergriffen)

Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren
von Dr. rer. nat. Arno Burmester

Nr. 5/März 1971

Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken
von Dr. rer. nat. Norbert Steiner

Nr. 6/April 1971

Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen
von Prof. Dr.-Ing. Paul Schneider

Nr. 7/Juli 1971

Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Petrowitz

Nr. 8/November 1971

Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Helmut Veith

Nr. 9/November 1971

Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Möller

Nr. 10/Januar 1972 (vergriffen)

Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode
von Dr.-Ing. Dietmar Aurich und Prof. Dr. phil. Erich Martin

Nr. 11/Februar 1972

Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Krause

Nr. 12/Mai 1972

Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren
von Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. Hubert Feuerberg

Nr. 13/Juni 1972

Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig (Berichter), Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirsche, Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig und Dipl.-Phys. Harald Tischer

Nr. 14/Juli 1972

Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz
von Eberhard Fischer

Nr. 15/August 1972

Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Heinz Pohl

Nr. 16/August 1972

Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer
von Dr.-Ing. Erwin Knublauch

Nr. 17/August 1972

Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen
von Dr.-Ing. Peter Reimers

Nr. 18/Januar 1973

Das Sprödbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten

Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches

von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 19/Januar 1973

Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. K. Kaffanke und Dr.-Ing. H. Czichos

Nr. 20/April 1973

Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 21/Juli 1973

Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. D. Klaffke und Dr.-Ing. W. Maennig

Nr. 22/Juli 1973

Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi und Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 23/November 1973

Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen
von Prof. Dr. rer. nat. habil. Walter Ruske

Nr. 24/November 1973

Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung
von Dipl.-Ing. J. Stanke, Ing. grad. E. Klement und Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 25/Dezember 1973

Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen
von Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 26/August 1974

Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen —
von Dipl.-Ing. P. Jost, Dr.-Ing. P. Reimers und Dr.-Ing. P. Weise

Nr. 27/August 1974

Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg

Nr. 28/August 1974

Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern
von Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 29/August 1974

Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall
von Prof. Dr.-Ing. P. Schneider

Nr. 30/September 1974 (vergriffen)

The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology
von Dr. Horst Czichos und Dr. Geert Salomon

Nr. 31/August 1975

Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung
von Dr.-Ing. Gerhard Fuhrmann

Nr. 32/September 1975

Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen
von Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Bernhard Böttcher

Nr. 33/November 1975

Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens
von Dipl.-Ing. Armin Wagner, Dipl.-Phys. Gerhard Kieper und Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 34/Januar 1976 (vergriffen)

Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoffen
von Dipl.-Forsting. Dr. rer. sylv. Hans-Joachim Deppe

Nr. 35/Januar 1976

Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dipl.-Ing. Ernst Limberger

Nr. 36/Januar 1976 (vergriffen)

Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles
von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt

- Nr. 37/Februar 1976
Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
 von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 38/Juni 1976
Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionisiertem Stahl 42 CrMo 4
 von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 39/Juni 1976
Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newton'schem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung
 von Prof. Dr.-Ing. K. Kirschke und Dipl.-Phys. G. Kempf
- Nr. 40/Juni 1976
Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren
 von Dr. rer. nat. H. Hantsche
- Nr. 41/Okttober 1976
Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten
 von Dr. rer. nat. Bernhard Böttcher
- Nr. 42/Okttober 1976
Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft
 von Dr.-Ing. Siegmund Dietlen
- Nr. 43/Okttober 1976
Das Sprödbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
 von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 44/November 1976
Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“
 von Dipl.-Ing. W. Matthees
- Nr. 45/Dezember 1976
Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten
 von Dr.-Ing. W. Paatsch
- Nr. 46/Mai 1977 (vergriffen)
Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung
Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses
 von Dipl.-Ing. Gerald Schickert und Dipl.-Ing. Helmut Winkler
- Nr. 47/Juni 1977
Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen
 von Dr.-Ing. Arno Plank
- Nr. 48/Okttober 1977
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn
 von Dr.-Ing. U. Holzlöhner
- Nr. 49/Dezember 1977
Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung
 von Dr.-Ing. Günther Wittig
- Nr. 50/Juni 1978 (vergriffen)
Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
 von Prof. Dipl.-Phys. Norbert Czaika, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz Andreae und Dipl.-Ing. Winfried Markowski
- Nr. 51/Juni 1978
Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen
 von Dr. rer. nat. J. Sickfeld
- Nr. 52/August 1978
Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung
 von Dr.-Ing. Aleksandar Tomov
- Nr. 53/Okttober 1978
Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge
 von Rolf Günter Rohrmann und Reinald Rudolphi
- Nr. 54/Okttober 1978
Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung
 von Dr.-Ing. Harro Sander
- Nr. 55/November 1978
Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung
 von Dr.-Ing. Dieter Klaffke
- Nr. 56/Januar 1979
Stabilität von Sandwichbauteilen
 von Dipl.-Ing. W. Brünner und Prof. Dr.-Ing. C. Langlie
- Nr. 57/März 1979
Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung
Investigations on Inspection-Media for Magnetic-Particle-Testing
 von Dipl.-Ing. Meinhard Stadthaus
- Nr. 58/März 1979
Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau
 von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 59/Juli 1979
Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl
 von Dr.-Ing. Günther Plauk
- Nr. 60/August 1979
Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken
 von Dr.-Ing. H. Spreckelmeyer, Dr.-Ing. R. Helms und Dr.-Ing. J. Ziebs
- Nr. 61/Dezember 1979
Beschreibung von Problemen der höheren Farbmeterik mit Hilfe des Gegenfarbensystems
 von Dr. Klaus Richter
- Nr. 62/Dezember 1979
Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
 von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerisch und Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Günther Becker
- Nr. 63/Dezember 1979
Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
 von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig
- Nr. 64/Februar 1980
Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schlenengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung
 von Dr.-Ing. Werner Rücker
- Nr. 65/Februar 1980
Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
 von Dr.-Ing. Peter Schmidt, Dr.-Ing. Dietmar Aurich, Dr.-Ing. Rolf Helms, Dr.-Ing. Helmut Veith und Dr.-Ing. Josef Ziebs
- Nr. 66/Mai 1980
Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung
 von Dr. rer. nat. Martin Hattwig
- Nr. 67/Mai 1980
Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung
 von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees
- Nr. 68/Mai 1980
Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik.
Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Goniometers
 von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn
- Nr. 69/Juni 1980
Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitshüllen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise
 von Dr.-Ing. Frank Buchardt und Dipl.-Ing. Peter Brandl
- Nr. 70/August 1980 (vergriffen)
Schwellenwerte beim Betondruckversuch
 von Dr.-Ing. Gerald Schickert
- Nr. 71/August 1980
Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen
 von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees und Dipl.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 72/September 1980
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen
 von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 73/November 1980

Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen
von Dipl.-Ing. Peter Wegener

Nr. 74/November 1980

ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dipl.-Inform. Renate Müller

Nr. 75/November 1980

Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen
von Dir. u. Prof. Dr. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 76/November 1980

Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig

Nr. 77/April 1981

Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen
von Dipl.-Ing. Michael Gierloff und Dr.-Ing. Matthias Maultzsch

Nr. 78/September 1981

Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund
von Dr.-Ing. Werner Rücker

Nr. 79/Dezember 1981

Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kalttribneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch
von Dr.-Ing. Volker Neumann

Nr. 80/Dezember 1981

Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten
von Dr.-Ing. Arno Plank, Dr.-Ing. Werner Struck und Dr.-Ing. Manfred Tzschätzsch

Nr. 81/Dezember 1981

Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik
von Dipl.-Ing. Jürgen Schmidt

Nr. 82/April 1982

Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches
Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test
von Rolf Helms, Hans-Joachim Kühn und Siegmund Ledworuski

Nr. 83/Juli 1982

Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen — Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen —
von Prof. Dr.-Ing. Horst Czichos und Dr.-Ing. Paul Feinle

Nr. 84/Juli 1982

Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)
von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/Oktober 1982

Technische Materialforschung und -prüfung — Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ — Materials Research and Testing — Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme „Basic Technological Research“ —
von Prof. Dr. Horst Czichos

Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/November 1982

Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale
von Dr.-Ing. Konrad Niesel und Dr. rer. nat. Peter Schimmelwitz

Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/Dezember 1982

Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren
von Dr.-Ing. Bernd Isecke und Dr.-Ing. Wolfgang Stichel

Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/Februar 1983

Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Anton Erhard

Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/April 1983

Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid
von Dr. rer. nat. Dietrich Conrad und Dr.-Ing. Siegmund Dietlen

Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/April 1983

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen

Konzeption für geregelte Versuche

Versuchseinrichtung

Vorversuche an Stahlbetonbalken

von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter

Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/April 1983

Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz
von Dr.-Ing. Michael Weber

Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/August 1983

Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch

Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/August 1983

Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen
von Dr. rer. nat. Peter Städt

Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/August 1983

Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen
von Dr.-Ing. Xian-Quan Dong

Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/August 1983

Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten
von Dr.-Ing. Manfred Römer

Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/Oktober 1983

Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken
von Dr.-Ing. Heinz Eifler

Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/November 1983

Typische Bruchflächenbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung
von Dipl.-Ing. Gerhard Fuhrmann und Prof. Dr. rer. nat. Wolfram Schwarz

Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/Dezember 1983

Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschenwaren — Stretch- und Erholungsvermögen —
von Dr. rer. nat. Edmund Schnabel

Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/Dezember 1983

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Versuche an Stahlbetonbalken mit Biegebewehrung aus Betonstahl BSt 420/500 RK und BSt 1080/1320
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter

Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/Januar 1984

Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand
von Günter Klamrowski und Paul Neustupny

Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/Februar 1984

Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie
von Dr.-Ing. Peter Reimers, Dr. rer. nat. Jürgen Goebbels, Dr.-Ing. Heinrich Heidt, Dr.-Ing. Hans-Peter Weise und Dipl.-Phys. Kay Wilding

Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/März 1984

Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton
von Dr.-Ing. Götz Magiera

Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/März 1984

Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien
von Dr.-Ing. Dierk Schnitger

Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/April 1984

Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen
von Dr.-Ing. Michael Gierloff

Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/Juni 1984

Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen
von Dr.-Ing. Bernd Schulz-Forberg

Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/Oktober 1984

Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last
von Dr.-Ing. Jan Lehnert

Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/Oktober 1984

Korrosion von Stahlradiatoren
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel und Jörg Ehreke

Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/Oktober 1984

Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen — Ergebnisse von Modellrechnungen
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch

Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/Februar 1985

Zur Wirkung der Schrumpfbinderung auf den Schweißeigenspannungszustand und das Sprödbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N
von Dr.-Ing. Mohamed Omar

Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/Februar 1985

Wasserstoff als Energieträger
von Dr. Hermann Walde (Mitglied des Kuratoriums der BAM i. R.) und Dr. Bernhard Kropp

Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/Februar 1985

Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Analex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte
von Dr.-Ing. Kurt Ziegler

Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/Juli 1985

Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen
von Dr.-Ing. Wolfgang Lützw

Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/Juli 1985

Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungsrißkorrosion von Offshore-Konstruktionen
von Rolf Helms, Horst Henke, Gerhard Oelrich (BAM, Berlin) und Tetsuya Saito (NRIM, Japan)

Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/Juli 1985

Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen
von Dipl.-Ing. Peter Rose, Dipl.-Ing. Peter Raabe, Dipl.-Ing. Werner Daum und Andreas Szameit

Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/Juli 1985

Farbempfindungsmerkmal Elementarunton und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von in- und Umfeld
von Privatdozent Dr. Klaus Richter

Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/Okttober 1985

Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik
von Dr. rer. nat. Franz-Josef Kasper, Dipl.-Inform. Renate Müller, Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Armin Wagner

Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/Okttober 1985

**Materials Technologies and Techno-Economic Development
A study for the German Foundation for International Development
(Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)**
by Prof. Dr. H. Czichos in cooperation with Dr. G. Sievers,
Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Bonn

Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/Okttober 1985

**Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung
Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen**
von Dr. rer. nat. Hartwig Treumann, Dipl.-Ing. Hilmar Andre, Dr. rer. nat. Eduard Blossfeld, Dr. rer. nat. Norbert Pfeil und Ing. grad. Matthias-Michael Zindler

Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/November 1985

**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil I
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part I**
von Dipl.-Ing. Jürgen Herter, Dr.-Ing. Klaus Brandes und Dipl.-Ing. Ernst Limberger

Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/April 1986

Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung
von Dr.-Ing. Andreas Hecht

Nr. 121/ISBN 3-88 314-530-0/Juni 1986

Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen: Einflüsse von Stahlzusammensetzung und Wärmebehandlung
von Dr.-Ing. Paul Feinle und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig

Nr. 122/ISBN 3-88 314-521-1/Juli 1986

Entsorgung kerntechnischer Anlagen
von J. Mischke
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Forberg, K. E. Wieser und B. Droste

Nr. 123/ISBN 3-88 314-531-9/Juli 1986

Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der bei thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehende Brandgase
von Dr. rer. nat. Detlef Rennoch

Nr. 124/ISBN 3-88 314-538-6/Juli 1986

Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung
von Dr.-Ing. Hans-Martin Thomas

Nr. 125/ISBN 3-88 314-540-8/Juli 1986

Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolierung von Flüssiggas-Lagertanks
von Dr.-Ing. Bernhard Droste und Dipl.-Ing. Ulrich Probst

Nr. 126/ISBN 3-88 314-547-5/August 1986

Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel