

# Die Loch- und Muldenkorrosion in Zusammenhang mit der Qualität des Wassers und als Folge von Materialfehlern, Leistungsmängeln und Fahrlässigkeit

Otto Wollrab

## 1. Allgemeines

Ungeachtet der sich bei einem ausreichend karbonatharten Gleichgewichtswasser in Eisen-, Stahl- und Kupferleitungen ausbildenden Schutzschicht wird ein Großteil der Rohrleitungen herstellerseitig bereits prophylaktisch vorbehandelt, d. h. mit Schutzbeschichtungen versehen. Diese Maßnahmen sind in erster Linie für den Fall vorgesehen, daß das Wasser entweder von vornherein sauer-aggressive Eigenschaften besitzt, die sich aufbereitungstechnisch nicht eliminieren lassen, wie beispielsweise eine hohe Nichtkarbonathärte bei gleichzeitig geringer Karbonathärte, oder Wasser mit überschüssiger freier Kohlensäure ist, wie es vielfach in Eigenwasserversorgungsanlagen vorliegt, oder daß sich die Wasserbeschaffenheit im Laufe der Zeit entsprechend verschlechtert. Dabei würde insbesondere im erstgenannten Fall bei Anwesenheit überschüssiger Kohlensäure ein zunächst flächig verstärkter Angriff der Rohrwandungen erfolgen, der sich bei Eisen und Stahl dahingehend äußert, daß sich in zunehmendem Maße locker amorpher Rostschlamm, schichtweise unterlagert mit Magnetit auf den Rohrwandungen bildet, dem praktisch keine Schutzfunktion beizumessen ist. Die Korrosion schreitet also ungemindert fort, wobei es lokal zu Ablöseeffekten kommt – Rost besitzt ein größeres Volumen als Eisen – und somit Voraussetzungen für die Bildung von Belüftungselementen und daraus resultierenden Lochkorrosionen geschaffen werden.

Bei Kupferrohren erfährt die Umwandlung des Kupfer-I-oxids durch überschüssige Kohlensäure eine deutliche Beschleunigung. Dabei bildet sich u. a. (unter gleichzeitiger Hydrolyse des gebil-

deten Salzes) in starkem Maße Kupfer-Iloxidhydrat, das den Rohrwandungen in locker amorpher Form aufliegt und von dem sauerstoff- und kohlenstoffhaltigen Wasser ungehindert durchdrungen werden kann. Zumindest die Flächenkorrosion schreitet also in derartigen Fällen ungemindert fort.

Im Fall, daß das Wasser erst zu einem späteren Zeitpunkt aggressive Eigenschaften erhält, werden bereits vorhandene schützende Deckschichten wieder abgebaut.

Zur Prophylaxe werden daher beispielsweise Rohrnetzleitungen aus Gußeisen und Stahl in der Regel mit einem Innenschutz aus Zementmörtel versehen und Stahlrohre für Hausinstallationen verzinkt. (Bei stark aggressivem Wasser ist die Schutzfunktion der Zinkschicht jedoch vielfach nur begrenzt.) Darüber hinaus finden Rohrleitungen aus korrosionsbeständigem Beton, Asbestzement oder Kunststoff Verwendung. Bei Kupferrohren werden erhöhte Anforderungen an den Werkstoff gestellt.

Für die Fertigungsqualität der in der Trinkwasser-Hausinstallation in erster Linie verwendeten Werkstoffe verzinkter Stahl und Kupfer besteht, einer vielseitigen Problematik Rechnung tragend, eine umfangreiche Normung, die darüber hinaus durch ein ausführliches Regelwerk des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) sowie durch Verarbeitungshinweise der Herstellerverbände bzw. -organisationen (Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf, Deutsches Kupferinstitut, Berlin) untermauert wird. Sie unterliegen außerdem einer strengen Qualitätskontrolle.

## Feuerverzinkte Stahlrohre

Feuerverzinkte Stahlrohre finden in erster Linie in der Kaltwasser-Hausinstallation Verwendung. Es handelt sich dabei um nahtlose oder geschweißte und nach

DIN 2444 verzinkte Gewinderohre nach DIN 2440 bzw. 2441 aus unlegiertem Stahl, die durch entsprechende, gleichfalls verzinkte Tempergußfittings nach DIN 2950 miteinander verschraubt werden. Durch das Verfahren der Verzinkung erfolgt im Grenzbereich zur Stahloberfläche eine geringfügige, aber weitgehend gleichmäßige Legierung mit Eisen. Zweck dieser Maßnahme ist es, durch flächige Korrosion des gegenüber Eisen deutlich unedleren Zinks primär eine Schutzschicht aus basischem Zinkcarbonat aufzubauen. In der Folgezeit geht dann das Zink mehr oder weniger schnell in Lösung und wird kontinuierlich durch Eisen-III-oxidhydrat ersetzt, so daß sich letztendlich eine Deckschicht in Analogie zu ungeschützten Eisen- und Stahlrohren gebildet hat.

Die wichtigsten Voraussetzungen seitens der Werkstücke für den Aufbau einer wirksamen Schutzschicht sind eine einwandfreie Beschaffenheit der Stahlrohre, mit glatter Oberfläche, ohne Schweißgrate oder Schweißlücken und eine glatt und gleichmäßig aufgetragene Zinkschicht, wie sie nach dem Dampfausblasverfahren (zum Entfernen überschüssiger Zinkreste) nach DIN 2444 erzielt wird. Werden diese Voraussetzungen nicht erfüllt, besteht die Gefahr einer muldenförmigen Werkstoffzerstörung oder eines Lochfraßes. Bei zu stark aufgetragenen oder oberflächenrauhem Zinkschichten ist darüber hinaus ein selektiver Angriff mit der Folge einer Bildung sog. Zinkgeriesel, einer sandartigen Erscheinungsform des basischen Zinkcarbonats mit inkludierten Zinkresten, in Betracht zu ziehen.

## Kupferrohre

Kupfer besitzt aufgrund seines positiven Normalpotentials ( $\text{Cu}/\text{Cu}^{2+}$ ) von +0,35 V gegenüber Eisen ( $\text{Fe}/\text{Fe}^{2+}$ ) –0,44 V und Zink ( $\text{Zn}/\text{Zn}^{2+}$ ) –0,76 V zunächst einen wesentlichen Vorteil: Als (Halb)-Edelmetall wird es nur von sauerstoffabsplalten-

den Säuren (Salpetersäure, heiße konzentrierte Schwefelsäure u. a.) direkt und von anderen Säuren bzw. Salzen nur in Anwesenheit von Sauerstoff oder anderer oxidierender Substanzen indirekt angegriffen. Es ist also bei einer chemischen Korrosion grundsätzlich der Umweg über das Oxid erforderlich. Darüber hinaus ist das Material in kaltem Zustand deutlich besser verformbar, so daß in vielen Fällen Richtungsänderungen innerhalb der Rohrleitungen durch manuelles Biegen bewirkt werden. Abzweige und Paßstücke werden lediglich gelötet, so daß der zeitaufwendige Arbeitsgang des Gewindeschneidens entfällt, und schließlich erlaubt das Kupfer geringere Rohrquerschnitte und geringere Wanddicken.

Aber gerade der Vorteil des Kupfers, gegenüber Eisen und Zink deutlich edler zu sein, kann in der Trinkwasserinstallation gleichermaßen eine Schwäche darstellen: Da die zur Bildung einer wirksamen Schutzschicht (gleich welcher Reaktionsstufe) erforderliche Flächenkorrosion nur über die primäre Bildung von Kupfer-I-oxid verläuft, dieses sich jedoch mit dem im Wasser gelösten Sauerstoff nur relativ langsam bildet, erfordert es eine erheblich längere Zeitspanne als bei Eisen oder gar Zink, bis die Rohrwandungen ausreichend überdeckt sind. Und solange das nicht der Fall ist, ist Kupfer anfällig gegen Lochkorrosionen.

Für Kupfer gilt dabei die Faustregel, daß, sofern innerhalb einer Zeitspanne von ein bis drei Jahren keine korrosionsbedingten Rohrbrüche auftreten, sie auch in der Folgezeit in der Regel nicht mehr zu erwarten sind.

Die lokal verstärkte Korrosion kann als chemische Reaktion (Flußmittel), als elektrochemische Reaktion (Rost, Manganoxid) oder als Folge von Belüftungselementen (Zunder, Sand, Hanfreste u. ä.) in Erscheinung treten, wobei im wesentlichen zwischen zwei Erscheinungsformen zu unterscheiden ist, dem Typ I (vornehmlich in Kaltwasser) und dem Typ II (vornehmlich in Warmwasser).

Der Lochfraß Typ I (Abb. 1 und 2) zeichnet sich durch eine deutliche Überlagerung der Korrosionsstelle mit basischem Kupfercarbonat aus, während die Korrosionsgrube weitgehend mit kristallinem Kupfer-I-oxid und Kupfer-I-chlorid angefüllt ist und die Angriffsstelle in Höhe der ursprünglichen Wandung mit einer zusammenhängenden, teilweise perforierten Kupfer-I-oxidschicht überdeckt wird.

Beim Lochfraß Typ II (Abb. 3) werden die nadelstichtartigen Korrosionslöcher vielfach innenseitig durch flächig überlagernde amorphe Ablagerungen ver-

deckt, so daß ein scheinbar unzerstörtes Erscheinungsbild der Rohre gegeben ist. Die Korrosionsstellen zeichnen sich durch geringe Mengen grüner unlöslicher Kupfersulfate aus, während die Gruben weitgehend mit kristallinem Kupfer-I-oxid gefüllt sind.

Um der Gefährdung durch Lochfraß während der Ausbildungsphase der Deckschicht soweit wie möglich entgegenzuwirken, sind die für die Trinkwasserhausinstallation verwendeten nahtlos gezogenen Rohre mit glatter, porenfreier Oberfläche, entsprechend DIN 17 86 bzw. DIN 17 54, Teil 3, ausschließlich aus desoxidiertem SF-Kupfer nach DIN 17 87 zu fertigen. Für die Fittings gilt DIN 28 56, wobei Fittings aus SF-Kupfer, aus Rotguß und Messing (Werkstoffgruppe 1, 2 und 3) zulässig sind.

Besondere Beachtung ist den fertigungsbedingten Ziehresten (hartes Stangenmaterial, F 37) bzw. den Kohlenstoffrückständen (weich geglühte Rollenware, F 22) auf den Rohrwandungen zu widmen. Die Anwesenheit von Kohlenstoff (das Ziehrest wird beim Erhitzen der Rohre, nicht nur beim werkseitigen Glühen, sondern auch insbesondere beim Hartlöten in Kohlenstoff überführt) stört nicht nur die gleichmäßige Ausbildung der Deckschicht, vielmehr vermag der Kohlenstoff, den Lochfraß gleichermaßen zu forcieren, sofern er in filmartiger Form vorliegt. Aus diesem Grund darf laut Arbeitsblatt GW 392 des DVGW der Ziehrestgehalt (als C bestimmt) auf der Innenoberfläche harter Rohre bis 54 mm  $\phi$  1,0 mg bzw. über 54 mm  $\phi$  2 mg / dm<sup>2</sup> und der C-Gehalt bei weichen Rohren 0,2 mg / dm<sup>2</sup> nicht überschreiten. Im letztgenannten Fall dürfen filmartige und lokal verstärkte C-Rückstände nicht vorhanden sein. Bei einigen Fabrikaten werden die weichgeglühten Rohrwandungen darüber hinaus werkseitig bereits mit einer gleichmäßig ausgebildeten Kupfer-I-oxidschicht geliefert.

Prophylaktische Maßnahmen besitzen jedoch nur einen Wert, wenn sie vollständig vorgenommen werden und beispielsweise die Schutzschichten auch bei der Montage nicht teilweise wieder zerstört werden. Liegt hingegen die Schicht in ungleichmäßig deckender oder unvollständiger Form vor, oder weist sie Risse oder Abplatzungen auf, kann die Schutzfunktion ins Gegenteil umgekehrt werden und somit Mulden- und Lochkorrosion begünstigt werden.

Bei der Korrosion der Rohrleitungen ist zunächst grundsätzlich zwischen folgenden wesentlichen Erscheinungsformen zu unterscheiden:

- 1.) Der ebenmäßigen (Flächen-) Korrosion, die sich von einem chemischen

Abtrag der Rohrwandung ableitet und in der Regel, die Rohrwanddicke berücksichtigt, als relativ unbedenklich anzusehen ist. (Die natürliche Schutzschichtbildung stellt eine spezielle Form der Flächenkorrosion dar.)

- 2.) Mulden- und Lochkorrosion, die sowohl auf chemische als auch elektrochemische Einflüsse (Spaltkorrosion, Kontaktkorrosion u. ä.) zurückzuführen sein können, sowie
- 3.) sonstigen physikalischen und mechanischen Korrosionen, wie beispielsweise der interkristallinen Korrosion, der Spannungskorrosion oder anderen Erscheinungsformen.

Der Thematik entsprechend, wird im folgenden in erster Linie die Lochkorrosion im Inneren der Trinkwasserinstallationen behandelt, sofern jedoch im Laufe der Abhandlungen generelle Probleme einer anders gearteten Werkstoffzerstörung tangiert werden, wie beispielsweise bei der handwerklichen Ausführung der Installationsarbeiten, wird kurz darauf eingegangen.

## 2. Begünstigung der Korrosion durch die Qualität des Wassers

An der Lochkorrosion sind die im Wasser vorhandenen Elektrolyte, d. h. sowohl die freie Kohlensäure als auch die verschiedenen Salze in starkem Maße beteiligt. Es ist jedoch weitgehend falsch, anzunehmen, ihre Anwesenheit in erhöhten Konzentrationen würde allein schon ausreichen, Lochkorrosionen auszulösen. Aufgrund ihrer gleichmäßigen Verteilung im Wasser wären sie nur in der Lage, eine chemische Flächenkorrosion zu bewirken. Liegen jedoch im Bereich der Rohrwandungen Umstände vor, die eine gegenüber der ebenmäßigen Korrosion verstärkte Reaktion bewirken, beteiligen sie sich zwangsläufig entsprechend intensiver an der Werkstoffzerstörung. Die Korrosion erfährt dabei teilweise durch erhöhte Konzentration an Salzen und der aus ihrem Dissoziationsgrad resultierenden besseren elektrischen Leitfähigkeit eine deutliche Beschleunigung. Folgerichtig sind also derartige Korrosionen ohne gleichzeitige Anwesenheit von Elektrolyten nicht möglich, so daß selbst unter sonst optimalen Umständen in extrem salzarmem Wasser die Lochkorrosion deutlich verzögert abläuft.

Ungeachtet des Elektrolytgehaltes des Wassers und der Anwesenheit lochkorrosionsauslösender Keime, sog. Korrosionselemente auf der Rohrwandung, werden schließlich derartige Ereignisse erst durch den im Wasser gelösten Sauerstoff ermöglicht. So treten sie in

geschlossenen Heizungssystemen erst in Erscheinung, wenn mehr oder weniger kontinuierlich Frischwasser nachgefüllt wird, beispielsweise um Leckverluste als Folge undichter Schweißverbindungen zu ergänzen oder wenn bei zwangsumwälzten Anlagen Luftsauerstoff injiziert wird.

Zusammenfassend müssen also für das Zustandekommen einer Lochkorrosion folgende drei Voraussetzungen gegeben sein:

1. Ein deutlicher Elektrolytgehalt des Wassers,
2. ein ausreichend hoher Sauerstoffgehalt
3. und auslösende Korrosionselemente unterschiedlichster Art,

wobei bei den beiden erstgenannten keine oder nur begrenzte Möglichkeiten prophylaktischer Maßnahmen bestehen, wohl aber bei den Korrosionselementen.

Der lokal verstärkten Werkstoffzerstörung entsprechend, bilden sich große Mengen von Korrosionsprodukten, die sich darüber hinaus durch ein großes Volumen auszeichnen, so daß in der Regel selbst geringfügige, sich im Anfangsstadium befindende Korrosionsstellen von ihnen relativ schnell häufchenartig überdeckt werden.

Insbesondere in Gleichgewichtswässern wird dabei ein Teil der Salze durch Hydrolyse in schwerlösliche basische Salze überführt, die z.T. in kristalliner Form innerhalb der übrigen Produkte aufwachsen. Derartig ausgeschiedene Salze, vornehmlich Chloride und Sulfate, bei Kupfer und Zink auch Karbonate, sind dem Korrosionsprozeß entzogen und somit scheinbar als eliminiert anzusehen.

Die Hydrolyse ist jedoch mit der gleichzeitigen Bildung von Wasserstoffionen verbunden, so daß der eigentliche Korrosionsbereich sauer reagiert.

Darüber hinaus erzeugt die Bildung dieser basischen Salze ein Defizit der entsprechenden Ionen in diesem Bereich, das aus dem umgebenden Leitungswasser wieder ausgeglichen und somit der Korrosionsmechanismus aufrecht erhalten wird.

Bei aggressivem Wasser ist primär weniger der aus dieser Eigenschaft abzuleitende Werkstoffangriff als kritisch anzusehen, er erfolgt in der Regel als flächig-ebenenmäßiger Abtrag, als vielmehr die dabei entstehenden Korrosionsprodukte. Das gilt in besonderem Maße für die ungeschützten Gußeisenleitungen älterer Versorgungsnetze und dem aus

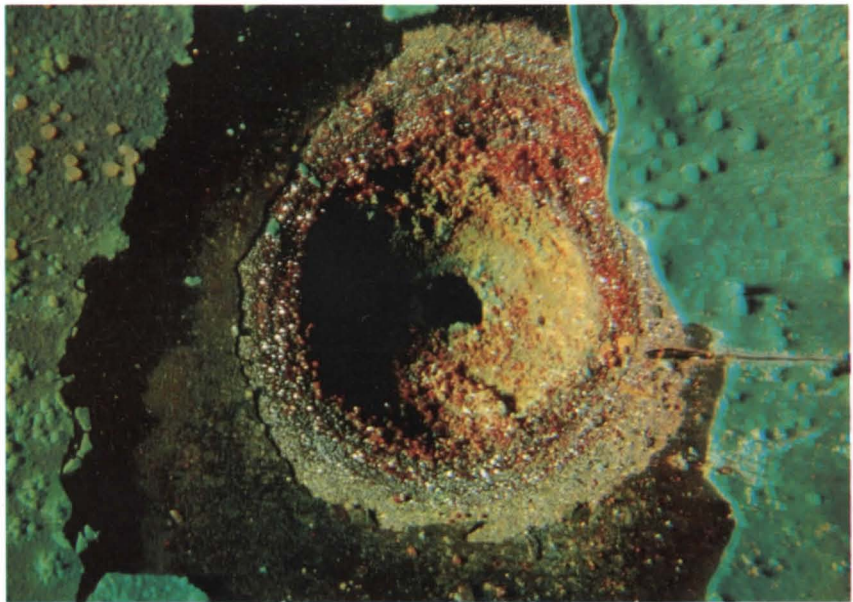


Abb. 1. Lochfraß Typ I, Korrosionsgrube (durch ausströmendes Wasser freigespült) nach Beseitigung der überdeckenden Korrosionsprodukte. Vergrößerung 16:1

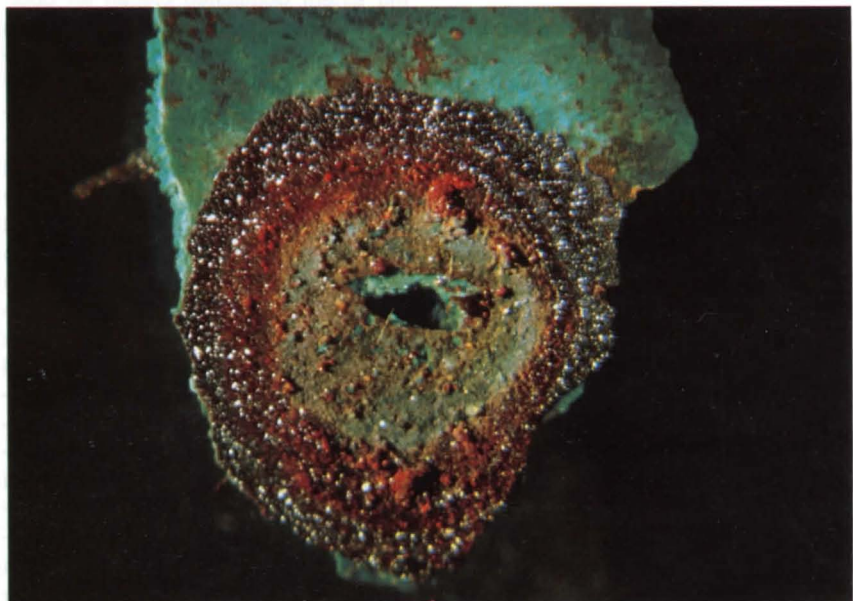


Abb. 2. dito, Rückseite der überdeckenden Korrosionsprodukte mit ursächlichen Schmutzablagerungen. Vergrößerung 16:1

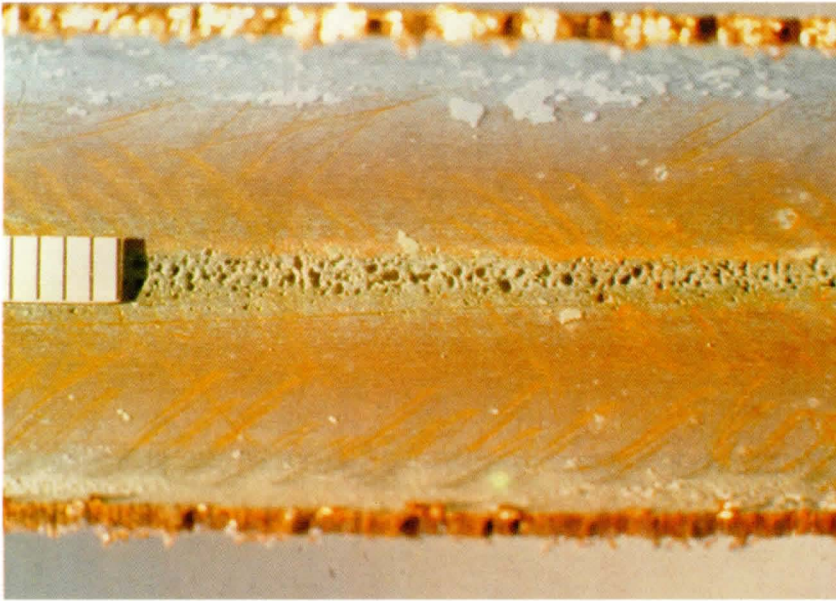


Abb. 3. Bandförmiger Lochfraß Typ III auf der Rohrsohle einer waagrecht installierten Warmwasserleitung aus Kupfer durch Mangandioxid in kohlesäureaggressivem Wasser. (Die die Korrosionsgruben überlagernde locker amorphe Deckschicht wurde mechanisch entfernt)

der diesbezüglichen Korrosion resultierenden Rostschlamm, der dann in der weiteren Folge in die Hausinstallation eingeschleppt wird und hier, insbesondere wenn es sich um Neuinstallationen handelt, bei denen sich noch keine wirksame Deckschicht ausgebildet hat, die Grundlage für Lochkorrosion darstellt.

Das gleiche gilt für unzureichend aufbereitetes Wasser oder Filterdurchschläge (nach Rückspülungen), wenn auf diese Weise Rost oder, was bei Kupferrohren der WW-Installation gegebenfalls noch schlimmer sein kann, Mangandioxidschlamm in die Installation gelangt. Es sollte daher grundsätzlich der Hauseinspeisung ein Mikrofeinfilter mit einer Maschenweite von ca. 50 µm vorgeschaltet werden.

Die aus diesem Einschleppen von Rostschlamm resultierende lokale Folgekorrosion kann dabei durchaus unterschiedliche Reaktionsmechanismen aufweisen. Die häufigste Ursache stellt die Spaltkorrosion (Belüftungs- oder Evansselement) dar. Sie wird durch die Tendenz des Rostschlammes, im Wasserstrom zu größeren Partikeln zu koagulieren, deutlich begünstigt. In übersäuertem Wasser kann sich jedoch gleichermaßen das positive Redoxpotential (+0,77 V) des Rosts (Eisen-III-oxidhydrat) gegenüber den

Normalpotentialen des Zinks (-0,76 V) und des Kupfers (+0,35 V) dahingehend auswirken, daß sich Pseudolokalelemente bilden und somit Lochkorrosionen auslösen.

Insbesondere in kleineren Wasserwerken gelangt vielfach unbewußt Wasser mit einem deutlichen Gehalt an überschüssiger Kohlensäure ins Rohrnetz. Es handelt sich um Werke mit geschlossenen Schnellfilteranlagen, bei denen der zur Aufbereitung erforderliche Luftsauerstoff mittels Kompressoren in das verdüστε Rohwasser gepreßt wird, während jedoch die Kohlensäure nicht quantitativ auszugasen in der Lage ist. Im Regelfall gelangt das Reinwasser anschließend in einen Speicherbehälter, in dem sich dann das der Karbonathärte entsprechende Gleichgewicht nach dem Entspannen einstellt. In den vorgenannten Fällen wird das Wasser jedoch mangels Speicherkapazität unmittelbar nach der Aufbereitung ins Rohrnetz eingespeist. Die Überwachung dieser Werke erfolgt dabei quasi per „Ferndiagnose“, indem entsprechende Wasserproben zwar vorschriftsmäßig entnommen werden, dann aber per Boten oder gar per Post zum Untersuchungslabor übermittelt werden, wo sie dann, mittlerweile entspannt, einen einwandfreien Aufbereitungseffekt vortäuschen.

Über die Gefahren, die beim Vermischen unterschiedlich karbonatharter Wässer hinsichtlich der Kohlensäure bestehen, wurde bereits ausführlich in „schaden-prisma“ Heft 3/85 berichtet.

Da das Wasser von sich aus bereits in der Lage ist, sämtliche drei Voraussetzungen für Lochkorrosionen zu erfüllen, ist auf die Qualitätsüberwachung und die Beurteilung der Analyseergebnisse besonderes Gewicht zu legen. Insbesondere die DIN 50930, Teil 1 bis 5, „Korrosionsverhalten von metallischen Werkstoffen gegenüber Wasser“ befaßt sich ausführlich mit dieser Problematik. Dabei wird in der Norm, dem „Gesetz über Einheiten im Meßwesen“ vom 6. 7. 1973 und dem derzeitigen Stand der Normung entsprechend, die Menge der jeweils im Wasser gelösten Stoffe in mol/m<sup>3</sup> mit einem den chemischen Kurzzeichen vorangestellten c (Konzentration) angegeben. Für die im Wasser gelösten Ionen wie Calcium, Magnesium, Chlorid, Sulfat usw. ergibt sich daraus lediglich eine entsprechende Umrechnung und in konsequenter Anwendung wird dabei aus der Karbonathärte die Säurekapazität bis pH 4,3 (K<sub>S</sub> 4,3). Unverständlich erscheint jedoch, daß die freie Kohlensäure, die nach den „Deutschen Einheitsverfahren zur Wasser-Abwasser- und Schlammuntersuchung“ als Basekapazität bis pH 8,2 angegeben wird, nicht enthalten ist, wengleich zu berücksichtigen ist, daß durch diesen Wert sowohl die freie Kohlensäure als auch die aus der sauren Hydrolyse der Nichtkarbonathärte resultierende Absenkung des pH-Wertes erfaßt wird. Ebenfalls ist kritisch anzumerken, daß zwar dem Mangangehalt des Wassers berechtigterweise analytischer Wert beigemessen wird, nicht jedoch dem Eisengehalt, obwohl von allen Seiten auf die Gefahren durch (koagulierte) Eisen-III-oxidhydratverunreinigungen verwiesen wird.

Ungeachtet dieser kurzen kritischen Anmerkung beinhaltet die Norm in ihren einzelnen, speziell auf die jeweiligen Werkstoffe bezogenen Teilen eine Fülle von Informationsmaterial, das hier nur im wesentlichen wiedergegeben werden kann.

Die zur Ausbildung der Deckschicht erforderliche gleichmäßige Flächenkorrosion wird bei verzinkten Stahlrohren begünstigt, wenn

der pH-Wert > 7,0  
 die K<sub>S</sub> 4,3 > 1 mol/m<sup>3</sup> ≙ 28,8 dKH  
 und  
 c (Ca<sup>2+</sup>) > 0,5 mol/m<sup>3</sup> ≙ 28 mg CaO/l  
 ist.

Schäden durch Muldenkorrosion sind wenig zu befürchten, wenn

$$\frac{c(\text{Cl}^-) + c(1/2 \text{SO}_4^{2-})}{K_S 4,3} < 1 \text{ ist, bei gleich-$$

zeitigem pH-Wert  $> 7,5$  und einer  $K_S 4,3 > 2 \text{ mol}$ , darüber hinaus grundsätzlich, wenn  $c(\text{O}_2) < 0,1 \text{ g/m}^3$  ist. Sie erhöhen sich, insbesondere in Kaltwasserleitungen, wenn das o. a. Verhältnis  $> 3$  ist. Bei hohen Nitratgehalten (eingewanderte Düngesalze) erhöht sich die Gefahr der selektiven Korrosion, wenn zusätzlich

$$\frac{c(\text{Cl}^-) + c(1/2 \text{SO}_4^{2-})}{c(\text{NO}_3^-)} < 2 \text{ ist.}$$

Auf die Lochkorrosion und die Korrosion unter Blasenbildung (lokales Abheben der Zinkschicht) hat die Wasserbeschaffenheit (nach dem Stand der Kenntnis) keinen Einfluß.

Bei Kupfer besitzt bereits eine den Rohrwandungen aufliegende Kupfer-I-oxidschicht schützende Funktionen. Die darüber hinausgehende gleichmäßige Flächenkorrosion (Umwandlung in Kupfer-II-oxid und basisches Kupfercarbonat u. ä.) nimmt mit zunehmendem pH-Wert ab. Dabei sollte der pH-Wert möglichst  $> 7,0$  sein, was gleichzeitig eine Minderung der Lochkorrosionsgefährdung bedeutet. Analog verzinkten Stahlrohren tritt unterhalb eines Sauerstoffgehaltes von  $c(\text{O}_2) < 0,1 \text{ g/m}^3$  praktisch kein Lochfraß auf.

Insbesondere hinsichtlich der nahezu ausschließlich in Kaltwasserinstallationen auftretenden Lochkorrosion vom Typ I ist zwar bekannt, daß sowohl Chloride als auch steigende Sulfatgehalte die Tendenz zur Lochkorrosion fördern, Zusammenhänge lassen sich bislang jedoch noch nicht erkennen. Obwohl Natrium- und Nitrationen offensichtlich keinen wesentlichen Einfluß besitzen, scheinen steigende Natriumionengehalte den Prozeß jedoch zu fördern, steigende Nitrationen ihn zu hemmen.

Vergleichende Untersuchungen im IfS-Kiel, in die sowohl Wasser aus Lochfraßschwerpunktbereichen als auch Wässer, in denen Lochfraß Typ I praktisch nicht vorkommt, einbezogen wurden, ergaben bei Auftreten von Typ I in der Regel Störungen der Tillmanschen Gleichgewichtsverhältnisse (Karbonathärte/zugehörige Kohlensäure/pH-Wert), die sich dahingehend äußerten, daß selbst bei scheinbar kohlenstoffdefizitären Wässern die pH-Werte mehr oder weniger deutlich unter den Sollwerten liegen. Es ist zu vermuten, daß es sich hierbei um eine Folge der sauren Hydrolyse der Nichtkarbonathärte und deren Einwirkung auf die Karbonathärte handelt.

Unter diesem Aspekt durchgeführte Vergleiche ergaben lochkorrosionsbegünstigende Eigenschaften der Wässer, wenn der Quotient Q aus der Nichtkarbonathärte dividiert durch die Karbonathärte

$$\left( \frac{c(\text{Summe Erdalkalien}) - 1/2 K_S 4,3}{1/2 K_S 4,3} \right)$$

sich in einer Größenordnung von 0,5–1 bewegt, während praktisch keine Lochkorrosion auftritt, wenn  $Q < 0,15$  (geringes „Hydrolysepotential“) und wenn  $Q > 2$  (geringes „Hydrogencarbonatpotential“) sind.

Lochkorrosion Typ II tritt vornehmlich in Warmwasserinstallationen auf, insbesondere dann, wenn es sich um weiches, saures Wasser handelt. Am Werkstoffangriff besitzt der Sulfatgehalt einen wesentlichen Anteil, es zeichnet sich darüber hinaus jedoch auch eine deutliche Pufferwirkung des Hydrogencarbonatgehaltes ab, so daß sich bei

$$\frac{c(\text{HCO}_3^-)}{c(\text{SO}_4^{2-})} > 2 \text{ die Schadenwahrscheinlichkeit verringert.}$$

Mangengehalte  $> 1 \text{ mmol/m}^3$  können den Lochfraß Typ II begünstigen. Auf die Muldenkorrosion und die Erosionskorrosion hat die Wasserbeschaffenheit keinen Einfluß. Auf die selektive Korrosion bei zinkhaltigen Werkstoffen nehmen sowohl der Chloridgehalt als auch die  $K_S$  einen Einfluß.

### 3. Korrosionsschäden als Folge von Materialfehlern, Leistungsmängeln und Fahrlässigkeit

Neben den natürlichen Ursachen der Lochkorrosion ist jedoch noch ein, je nach Werkstoff unterschiedlich breites Spektrum weiterer auslösender Faktoren in Betracht zu ziehen. Sie sind zunächst wie folgt einzugliedern:

Materialfehler (herstellungsbedingt oder Transportschäden), Leistungsmängel (unvorschriftmäßiges, nicht den Regeln der Technik entsprechendes Errichten der Installationen u. a.), Fahrlässigkeit (Beschädigung oder Beeinträchtigung der Rohrleitungen vor oder nach der Installation, durch die mit der Ausführung der Arbeiten beauftragten oder andere Gewerke), aber auch unsachgemäße Nutzung der Installation durch den Betreiber.

#### Materialfehler, Transport- und Lager-schäden

Als Materialfehler bei feuerverzinkten Stahlrohren und Fittings (Abb. 4) sind Abweichungen insbesondere von den Normen DIN 2440, 2444 und 2950 zu verstehen, die sich in erster Linie in Form von Schweißgraten, Schweißlücken oder Schweißperlen, ungleichmäßiger Verzinkung und überschüssigen Zinkresten (Zinkperlen, Zinkbärte), sowie durchgewachsene Eisenzinklegierungen darstellen. Rohre nach den o. g. Normen sind kennzeichnungspflichtig. Bei Kupfer sind



Abb. 4. Korrosion eines Stahlrohres infolge ungleichmäßiger Verzinkung. (Die überdeckenden Korrosionsprodukte wurden mit inhibierter Säure entfernt)

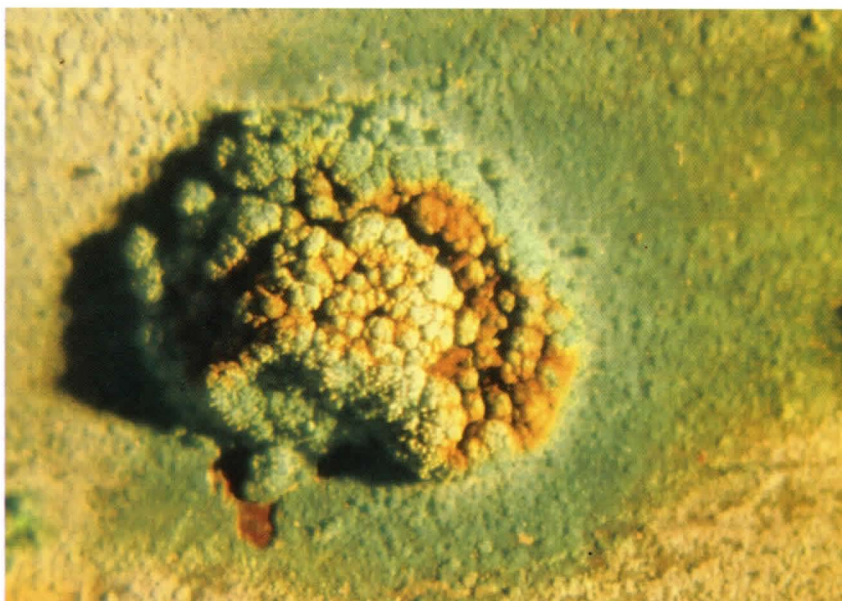


Abb. 5. Lochfraß vom Typ I in einem Kupferrohr. Die überdeckenden Korrosionsprodukte sind oberflächlich mit geringen Rostmengen bedeckt, die jedoch nicht ursächlich sind. Vergrößerung 16:1

ausschließlich Rohre nach DIN 1786 bzw. 1754, Teil 3, aus desoxidiertem SF-Kupfer nach DIN 1787 zugelassen. Als wesentlichster Materialfehler sind fertigungsbedingte Ziehfettrreste bei hartem Stangenmaterial (F 37) bzw. Kohlenstoff bei weicher Rollenware (F 22) anzusehen (siehe Abschnitt 1, Allgemeines: Kupferrohre).

Analog verzinkten Stahlrohren sind Kupferrohre kennzeichnungspflichtig.

Neben Beschädigungen jeder Art ist insbesondere in größeren Mengen ins Rohrinnere gelangendes Wasser (Regen, Seewasser bei Deckschichtungen o. ä.) in Betracht zu ziehen, da infolge der Bildung von Dreistoffbereichen (Metall, elektro-

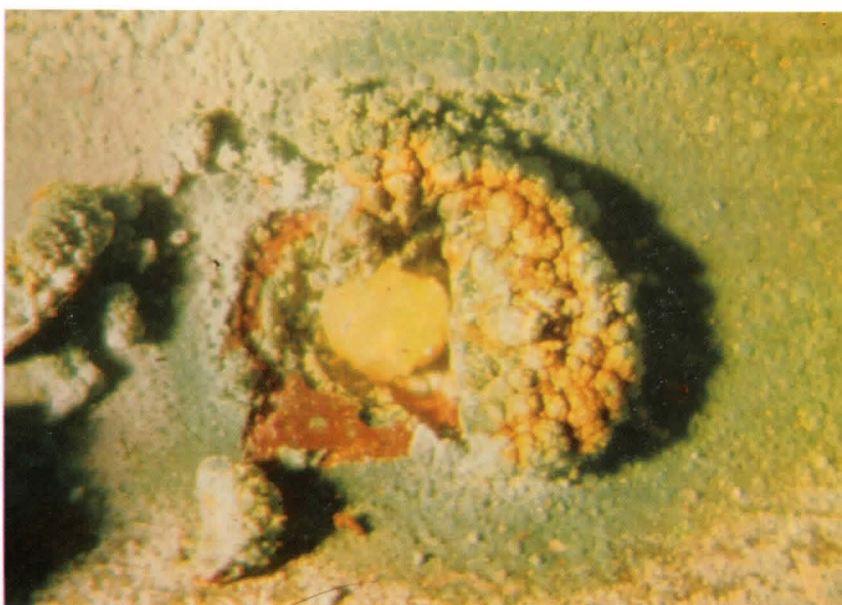


Abb. 6. Ursächliches Sandkorn im Inneren der Korrosionsprodukte. Vergrößerung 16:1

lythaltiges Wasser, Luftsauerstoff) bereits lokale Korrosionen vor der eigentlichen Installation einzusetzen in der Lage sind (siehe auch Abschnitt Leistungsmängel). Darüber hinaus besteht bei einer ebenerdigen Lagerung im Freien sehr leicht die Gefahr einer Verschmutzung der Innenrohre mit Sand o. ä., wobei bei längerer Lagerung infolge beginnender Korrosion die einzelnen Partikel u. U. durch die Korrosionsprodukte fest fixiert werden, so daß sie auch durch anschließendes Ausblasen oder Durchspülen nicht mehr zu beseitigen sind und somit die Ursache für spätere Spaltkorrosionen darstellen.

### Leistungsmängel und Fahrlässigkeit

Die gleiche Gefahr einer Verschmutzung durch Fremdstoffe (Abb. 5 und 6) besteht bei der Fertigung der Installation, wobei neben Sand insbesondere Säge- und Schneidespäne, Hanfreste, Dichtungsmittel u. ä. in Frage kommen. Da ein Durchspülen der Gesamtanlage nach Beendigung der Installationsarbeiten, wie sie nach DIN 1988 gefordert wird, in der Regel auf erhebliche Schwierigkeiten stößt, ist es zweckmäßig, so sauber wie möglich zu arbeiten und vor allem die Rohre vor dem Einbau mit Preßluft sauber zu blasen. Die Dichtheitsprüfung ist grundsätzlich mit reinem Wasser vorzunehmen. Um Korrosionen durch in den Leitungen verbleibendes Restwasser zu vermeiden (Dreistoffbereiche), sollte die Installation nach der Dichtheitsprüfung mit Wasser gefüllt bleiben. Bei Frostgefahr empfiehlt sich ein Trockenblasen mit Preßluft.

Beim Ablängen der Rohre ist Kaltsägen trotz der Gefahr einer Verschmutzung durch Späne günstiger zu bewerten als Rollschneiden, da die Gratbildung wesentlich geringer ist. Grate stellen nicht nur eine druckverbrauchende Querschnittsverengung dar, sie bewirken auch durch Wirbel lokale Störungen der Deckschichtbildung, ferner fangen sich an ihnen sehr leicht Fremdstoffe, die zu Ausbildung von „Korrosionskeimen“ führen können.

Besonders gefährdet sind Leitungen, die vorsorglich zum Zweck eines eventuellen späteren Anschlusses installiert (Stillstandsleitungen) und zunächst nur durch Eindrehen eines Stopfes o. ä. verschlossen werden. Abgesehen davon, daß ein in derartigen Rohren verbleibendes Luftpolster sich nur sehr langsam im Wasser löst und somit die Gefahr der Korrosion im Dreistoffbereich verstärkt besteht, kann sich infolge der Stagnation des Wassers keine schützende Deckschicht bilden. Bei Anwesenheit von Korrosions-elementen, wobei die Produkte der o. a. Korrosion im Dreistoffbereich bevorzugt dazuzählen, konzentriert sich der aus der

Hauptleitung in geringem Umfang eindringende Sauerstoff ausschließlich auf diese Bereiche. Die Folge sind Lochfraßschäden, u. U. in relativ kurzer Zeit. Die gleiche Gefahr besteht jedoch auch, wenn Installationen nach erfolgter Dichtungsprüfung über Monate bis zur Inbetriebnahme befüllt bleiben.

Warmwasserrohre erfahren je nach Wassertemperatur eine unterschiedliche Längenausdehnung. Insbesondere bei nicht ständig von Warmwasser durchflossenen Rohren führt das zu sich wiederholenden Bewegungen, die letztendlich zum Bruch der Bogen-Fittings führen, vor allem wenn diese fest fixiert sind. Bei fest eingebauten Längen von mehr als 3 m zwischen 2 Bögen sind daher Ausdehnungsschleifen oder Kompensatoren zu installieren.

Grundsätzlich sollten die fertig installierten Rohrenden sofort durch eingeschraubte Stopfen verschlossen werden, um Verschmutzungen durch nachfolgende Gewerke (Putzarbeiten o. ä.) zu vermeiden.

Bei Installationen in feuchtigkeitsgefährdeten Räumen sind Warmwasserrohre oberhalb der Kaltwasserrohre zu verlegen, um Kondenswasserbildungen soweit wie möglich zu unterbinden (Außenkorrosion). Bei verzinkten Stahlrohren sind Beschädigungen der inneren Zinkschicht, insbesondere beim Entgraten, auf jeden Fall zu vermeiden. Vereinzelt werden Rohre an den Trennstellen angeköhrt, vor allem, wenn es sich um mehrere kurze Paßstücke handelt, die unmittelbar nacheinander zu fertigen sind. Durch derartige Vorgänge wird die innere Zinkschicht lokal von der Rohrwand gelöst und somit einer Spaltkorrosion in diesem Bereich Vorschub geleistet. Die Gefahr besteht vor allem dann, wenn das Rohr aufgrund irgendwelcher Überlegungen an einer anderen Stelle abgelängt wird, so daß der betreffende Bereich auf diese Weise in die freie Rohrlänge gerät.

Beim Gewindeschneiden sind nur vorgeschriebene Gewindeschneidmittel zu verwenden. Es ist ferner darauf zu achten, daß die anfallenden Späne restlos aus den Rohren entfernt werden, wobei zu berücksichtigen ist, daß sie möglicherweise durch das Schneidemittel verklebt sein können und der Rohrwand fest anhaften. Die Rohre sind mit den Fittings auf ihrer ganzen nutzbaren Gewindelänge zu verschrauben. Hanfeinlagen sind sorgfältig den Gewindegängen einzupassen und nicht im Übermaß anzuwenden. Schraubverbindungen stellen generell Schwachpunkte der Stahlrohrinstallation dar. Die aus dem größeren Querschnitt des Fittings resultierende



Abb. 7. Korrosion eines Stahlrohrfittings durch Gewindeschneidespäne

Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit begünstigt die Fremdstoffablagerung gleichermaßen wie ins Rohrinne hineinragende Hanfreste, Grate und nicht „genutzte“ Gewindegänge. Bei unverfüllten Gewinden besteht zusätzlich die Gefahr von Spaltkorrosionen (Abb. 7).

Zink erfährt mit zunehmender Temperatur eine Verschiebung des freien Korrosionspotentials in den positiven Bereich, der bei 63°C zu einer scheinbaren „Potentialumkehr“ gegenüber dem Eisen führt, d. h. Zink wird „edler“ als Eisen. Auf diese Weise wird die Schutzfunktion der Zinkschicht weitgehend unwirksam.

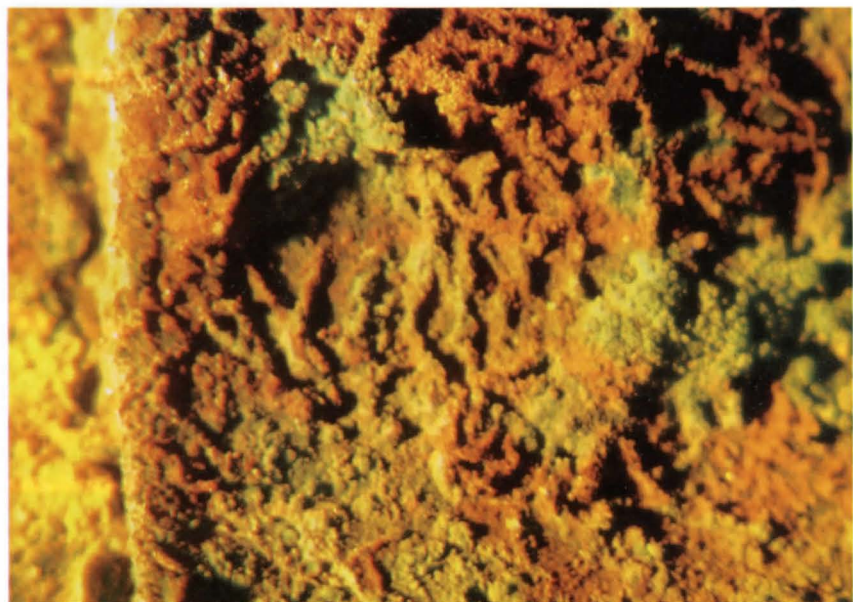


Abb. 8. Korrosion in einem Kupferrohr durch nicht entfernte Stahlwollreste vom Säubern der Lötstellen.  
Vergrößerung 16:1

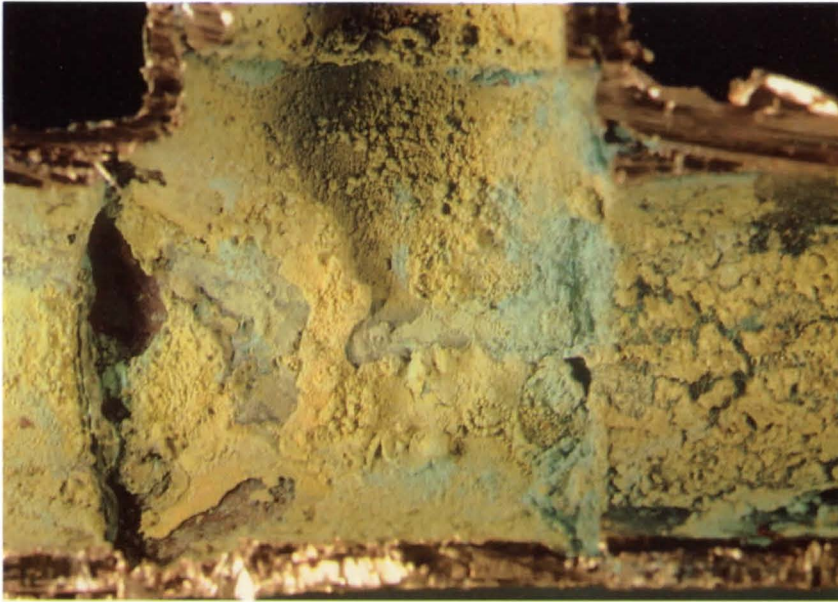


Abb. 9. Korrosion eines Kupferfittings durch unsachgemäß angewandtes Weichlotflußmittel. (Die überdeckenden Korrosionsprodukte gingen beim Auftrennen des Asservats verloren)

Zink gehört zur Gruppe der amphoteren Metalle, d. h. es vermag, analog Aluminium, sowohl mit Säuren als auch mit Basen zu reagieren. Aus diesem Grunde besteht bei Wässern mit einem pH-Wert  $> 8,3$  die Gefahr der Zerstörung der Zinkschicht. Als besonders kritisch ist in die-

sem Zusammenhang durch Basenaustauscher enthärtetes Wasser anzusehen (s. auch: „Wassergewinnung und Aufbereitung“ in „schadenprisma“ Heft 3/ 85), sofern die bei der Zersetzung des Natriumhydrogencarbonats freiwerdende Kohlensäure bereits im Warmwas-

serbereiter abgetrennt wird und der pH-Wert des Wassers somit in den alkalischen Bereich umschlägt. Sollte die Kohlensäure jedoch nicht entfernt werden, besteht in waagrecht verlegten Rohrleitungen zusätzlich die Gefahr einer Gasblasenkorrosion in der oberen Hälfte der Rohre (12.00-Uhr-Position).

Unter Berücksichtigung sämtlicher vorgenannter Fakten sind verzinkte Stahlrohre daher bei Warmwassersystemen nur angebracht, wenn gewährleistet ist, daß die Temperatur auf maximal  $60^{\circ}\text{C}$  begrenzt wird. Darüber hinaus erscheint bei basenaustauscherenthärtetem Wasser eine prophylaktische Inhibierung mit Orthophosphaten oder Silicaten angezeigt, eine Maßnahme, die in diesem Fall auch dem im Kaltwassersystem zwangsläufig auftretenden verstärkten Abtrag der Schutzschicht vorbeugt.

Aufgrund gebildeter Passivschichten ist Armierungsstahl in Beton elektrochemisch edler als der Stahl der Rohrleitungen. Insbesondere in feuchten Rohrleitungskanälen besteht daher die Gefahr einer Außenkorrosion, sofern sowohl ein direkter als auch indirekter Kontakt beider Werkstoffe gegeben ist.

Für Kupferrohrinstallationen gilt hinsichtlich der Sauberkeit der Ausführung das gleiche wie für verzinkte Stahlrohre. Auch hier sind die im  $90^{\circ}$ -Winkel abgelängten Rohre zu entgraten und möglichst noch vor dem Einbau von Spänen und insbesondere Stahlwollresten vom Reinigen der Rohrstümpfe zu säubern (Ausblasen), wobei darauf zu achten ist, daß auch Kunststoffspäne der gleichfalls durchtrennten PVC-Stegmängel „Korrosionskeime“ zu bilden in der Lage sind (Abb. 8).

Besondere Sorgfalt ist jedoch der Ausführung der Lötverbindungen zu widmen, wobei die Regeln der Technik auf jeden Fall einzuhalten sind. So sind beispielsweise die Rohre in ganzer Einschublänge in den Fitting einzuführen. Flußmittel haben den einschlägigen Normen (DIN 8511, Blatt 1 bzw. 2) zu entsprechen. Die beim Weichlöten verwendeten Flußmittel vom Typ F-SW 21 bzw. F-SW 22 enthalten u. a. stark sauer hydrolysierendes Zink- bzw. Ammoniumchlorid. Im Überschuß angewandte und ins Rohrrinnere gelangte derartige Flußmittel sind also in der Lage, lokal verstärkte Korrosionen hervorzurufen. Mit den Flußmitteln sind daher lediglich die einzupassenden Rohrenden außen dünn einzustreichen, keinesfalls jedoch die Fittings von innen. Darüber hinaus ist ein prophylaktisches gründliches Durchspülen der Installation mit sauberem, fremdstofffreiem Wasser auf jeden Fall angezeigt. Der Reinigungseffekt dieser Spülung wird durch Verwendung tensidhaltiger Flußmittel wesentlich begünstigt (Abb. 9 und 10).

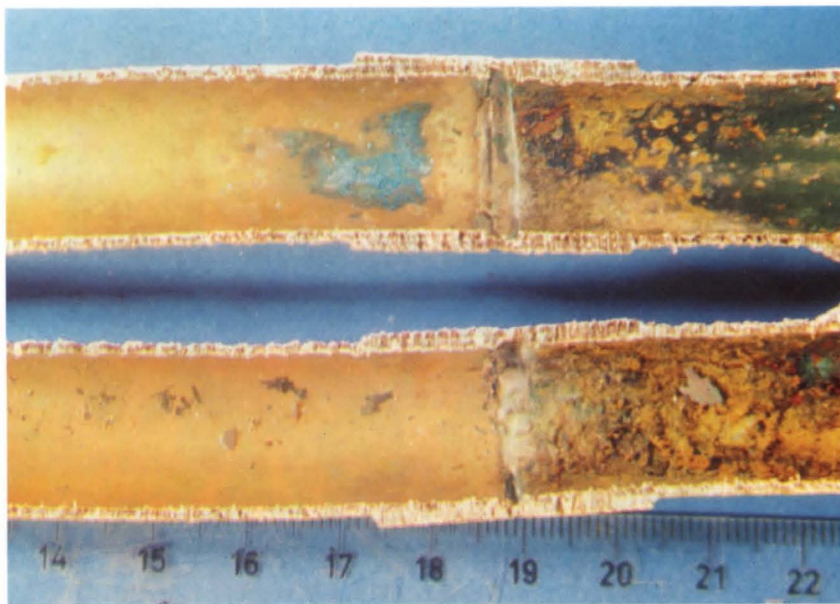


Abb. 10. Ein Wiederholungsfall. Beim Ausbessern eines Rohrbruches wurde abermals zuviel Lötflott angewandt, mit der Folge, daß auch das neu installierte Rohr bereits in Mitleidenschaft gezogen wurde.



Hartlötarbeiten werden vielfach unter Verwendung von Kupferbasislot L-CuP<sub>6</sub> nach DIN 8513, Teil 1, oder von silberhaltigem Lot L-Ag2P nach DIN 8513, Teil 2, durchgeführt. Lote dieser Typen ermöglichen ein Arbeiten ohne zusätzliche Zuhilfenahme von Flußmitteln, weshalb vielfach die Auffassung vertreten wird, es handele sich um flußmittelfreie Lote.

Derartige Lote enthalten durchschnittlich 6,2% Kupferphosphid als Quasilegierungsbestandteil. Dieses Kupferphosphid stellt ein starkes Reduktionsmittel dar und vermag Kupferoxid, wie es sich auf den Rohrwandungen als Folge der Erwärmung bildet, zu metallischem Kupfer zu reduzieren. Als Nebenprodukt entsteht Phosphorpentoxid, das sich mit überschüssigem Kupferoxid zu Kupfermetaphosphat umsetzt. Es besitzt also voll die Funktion eines Flußmittels. Kupfermetaphosphat löst sich relativ leicht in Wasser und wandelt sich durch Hydrolyse in Kupferorthophosphat um, wobei jedoch gleichzeitig Orthophosphorsäure gebildet wird. Analog Weichlotflußmitteln sind also auch beim Hartlöten lokale Folgekorrosionen möglich, sofern die Reaktionsprodukte ins Innere der Rohre bzw. Fittings gelangen (siehe „schadenprisma“ Heft 4 / 83).

Da die Menge des (in jedem Fall) gebildeten Kupfermetaphosphats direkt abhängig ist von der Menge des im Lötspalt vorhandenen Kupferoxids, treten daraus resultierende Korrosionen nicht auf, wenn vorschriftsmäßig gearbeitet wird. Die Gefahr derartiger Schäden vergrößert sich jedoch mit erhöhten Arbeitstemperaturen, verlängerten Vorwärm- und Arbeitszeiten, mit der Anzahl der Lötstellen (Abzweige) und vergrößerter Lötspalte, wie es beispielsweise beim direkten Verbund von Rohren mit unterschiedlichen Durchmessern (Rohr-in-Rohr), oder beim Aushalsen von Abzweigen ohne Fitting möglich ist.

Als bedenklich ist auch das vielfach praktizierte stumpfe Aufsetzen von Abzweigen, d. h. ohne Fittings und Aushalsungen, da hierbei das Lot z.T. ins Rohrinnere eindringt und hier mit dem in erheblichem Überschuß vorhandenen Kupferoxid reagiert.

Bei Abzweigen, die ohne Zuhilfenahme von Fittings durch manuelles Aushalsen gefertigt werden, ist darauf zu achten, daß das Abgangsrohr nicht zu tief eingeschoben und somit eine Querschnittsverengung des Hauptrohres herbeigeführt wird. Es besteht die Gefahr der Erosion durch verstärkte Turbulenzen sowie der Lochkorrosion durch abgeschiedene Fremdkörper.

Bei Mischinstallationen sind Kupferrohre grundsätzlich hinter Stahl- bzw. verzinkte

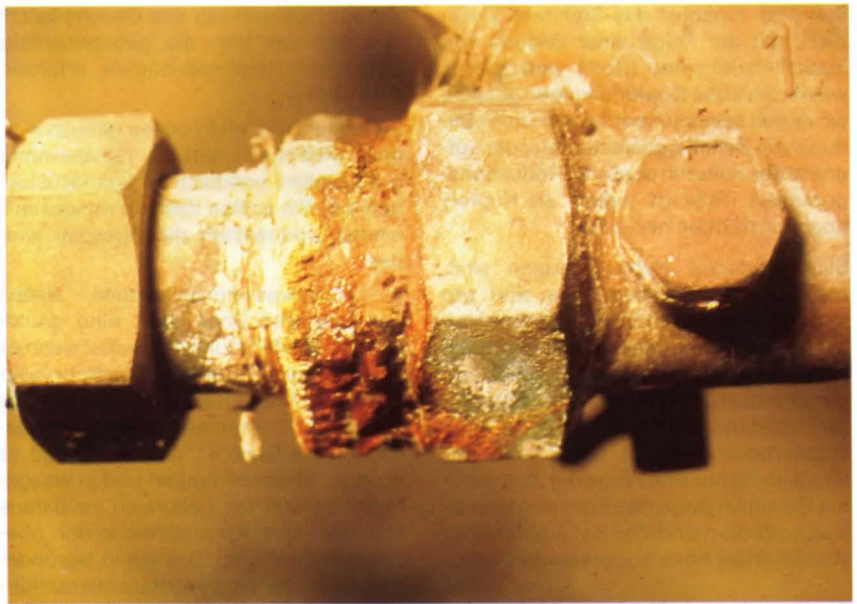


Abb. 11. Paßstück aus Stahl zwischen Absperrventil und Wassermengenzähler einer Hausinstallation.

Stahlrohre (in Fließrichtung) zu installieren (Gefahr der Kontaktkorrosion). Die gleiche Gefahr besteht bei kupfernen Zuleitungen von Warmwasserbereitern aus Stahl. Aber auch eine Installation von Stahlrohrteilen, beispielsweise in Form von Paßstücken, zwischen Kupferrohren

(oder auch zwischen Kupferrohren und Funktionsgeräten aus Messing wie Wassermengenzählern, Mikrofiltern oder Druckminderern) hat sowohl für das Stahlrohr als auch für die folgende, gesamte Kupferinstallation katastrophale Folgen (Abb. 11 und 12). In diesem

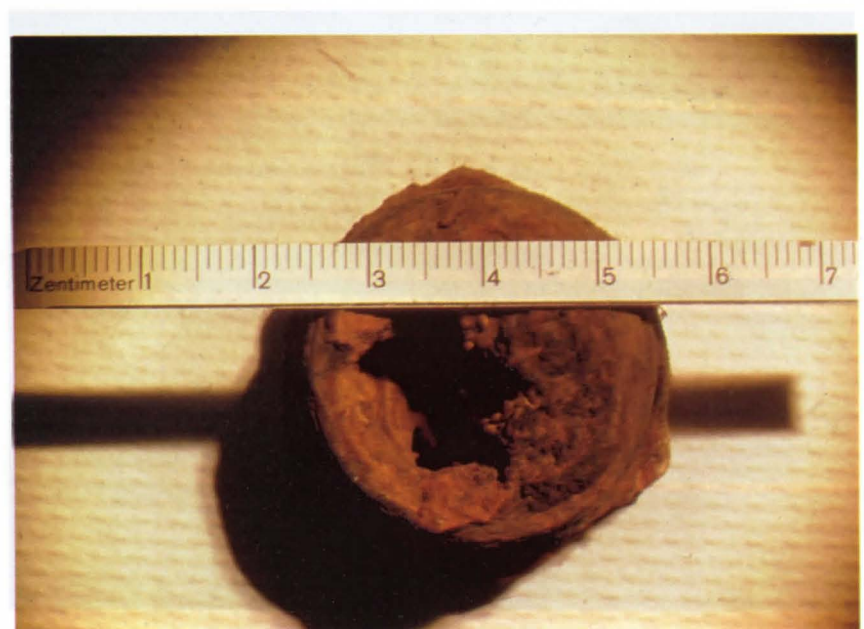


Abb. 12. Die Innenwand des Paßstücks ist rundum korrodiert.

Fall wird zunächst das Stahlrohr korrodiert, mit der Folge einer Bildung von Eisen-III-oxidhydrat (Rost) und dieses wiederum in die Kupferleitungen gespült, wo es nun seinerseits entweder durch Bildung von Belüftungselementen oder aufgrund des höheren positiven Reduktionspotentials (Rost ist „edler“ als Kupfer) Lochkorrosionen hervorruft.

Blind endende Kupferleitungen sind, sofern sie nicht zu vermeiden sind, wie beispielsweise Nachfülleitungen von Heizungsanlagen, auf keinen Fall mit Stahlstopfen zu verschließen. Abgesehen von der grundsätzlichen Gefährdung derartiger Stillstandsleitungen ist es, je nach Wasserbeschaffenheit und Länge der Blindleitung nur eine Frage der Zeit, wann die Gewindegänge des Stahlstopfens so weit korrodiert sind, daß der Stopfen vom Wasserdruck herausgeschleudert wird.

### Die Korrosion als Betriebsschaden

Derartige Schäden sind in der Regel auf mangelnde Wartung der Installation bzw. auf einen unsachgemäßen Betrieb zurückzuführen. Dabei ist im erstgenannten Fall zusätzlich zur Innenkorrosion ein äußerer Angriff der Rohrleitungen durch Feuchtigkeit anzuführen. In entsprechend gefährdeten Räumen ist also für einen entsprechenden Schutz zu sorgen.

Besondere Wartung erfordern Wasser-nachbehandlungsinstallationen, wie Basenaustauscher und Dosiereinrichtungen, deren Funktionsfähigkeit regelmäßig überprüft werden sollte. Insbesondere Basenaustauscher stellen u. U. gra-

vierende Eingriffe in das Gleichgewicht des Wassers dar, die gegebenenfalls zusätzliche Impfmaßnahmen erforderlich machen.

Leitungen, die relativ selten genutzt werden (Außenanschlüsse, Gästezimmer o. ä.) stellen praktisch Stillstandsleitungen dar. Sie sollten deshalb mindestens einmal wöchentlich durchgespült werden.

In Warmwasserinstallationen stellen Temperaturen über 60°C eine grundsätzliche Gefährdung dar, selbst wenn es sich nicht um verzinktes Stahlrohr, sondern um Kupferleitungen handelt. Mit steigender Temperatur nimmt die Löslichkeit der Gase im Wasser ab und es kann zu Blasenbildungen und in waagrecht installierten Leitungen zu daraus resultierenden Korrosionen in den oberen Hälften führen. Das gilt in besonderem Maße für basenaustauscherenthärtetes Wasser, da das anstelle der Erdalkalihydrogenkarbonate vorhandene Natriumsalz ebenfalls bei derartigen Temperaturen zersetzt wird, wobei das Wasser darüber hinaus noch deutlich alkalisch reagiert, sofern das Gas in einem Gasabscheider entfernt wird. Es besteht die Gefahr einer selektiven Entzinkung in Messingarmaturen (Abb. 13).

Bei zwangsumgewälzten Warmwasserzirkulationsleitungen besteht bei zu hoher Strömungsgeschwindigkeit die Gefahr von Erosionskorrosionen an kritischen Stellen (Querschnittverengungen durch Grate, Fremdkörper usw.). Die Strömungsgeschwindigkeit sollte daher 0,5 m/s nicht überschreiten.

### Literatur

[1] Helmuth Orth:  
„Korrosion und Korrosionsschutz“  
Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft  
mbH,  
Stuttgart 1974

[2] Eberhard Herre:  
„Korrosionsschutz in der Sanitärtechnik  
und Warmwasserversorgung“  
Kramer Verlag,  
Düsseldorf, 1972

[3] Fritz Tödt:  
„Korrosion und Korrosionsschutz“  
Walter de Gruyter & Co.,  
Berlin, 1961

[4] DIN 1988:  
Trinkwasser-Leitungsanlagen in Grund-  
stücken, Technische Bestimmungen für  
Bau und Betrieb

[5] DIN 50 900, Teil 1:  
Korrosion der Metalle, Begriffe, Allge-  
meine Begriffe

[6] DIN 50 930, Teil 1-5:  
Korrosionsverhalten von metallischen  
Werkstoffen gegenüber Wasser

[7] DIN Taschenbuch 62:  
Wasserversorgung 2, Normen über  
Rohre und Formstücke

[8] Merkblatt 405:  
Das Stahlrohr in der Hausinstallation –  
Vermeidung von Korrosionsschäden.  
Beratungsstelle für Stahlverwendung,  
Düsseldorf, 1981

[9] DVGW-Arbeitsblatt: GW 392  
Nahtlos gezogene Rohre aus Kupfer für  
Gas- und Wasserinstallationen,  
ZfGW-Verlag,  
Frankfurt, 1983

[10] DVGW-Arbeitsblatt: GW 2  
Verbinden von Kupferrohren für die Gas-  
und Wasserinstallation innerhalb von  
Grundstücken und Gebäuden,  
ZfGW-Verlag,  
Frankfurt, 1983

[11] DKI-Sonderdruck S.158:  
H. Blaschke, K. Rustenbach,  
„Die fachgerechte Kupferrohr-Installa-  
tion“  
Deutsches Kupfer-Institut,  
Berlin, 1981

[12] DKI-Sonderdruck S.177:  
O. v. Franqué, B. Winkler  
„Korrosion und Korrosionsschäden an  
Wasserleitungsrohren aus Kupfer“  
Deutsches Kupfer-Institut,  
Berlin, 1982

[13] I. Wagner:  
„Spülung von Trinkwasserinstallations-  
leitungen“  
DVGW-Schriftenreihe Wasser Nr. 41

Merkblatthinweis:  
„Wissenswertes über Leitungswasser-  
schäden“  
Institut für Schadenverhütung und Scha-  
denforschung (IfS), Kiel, 1986

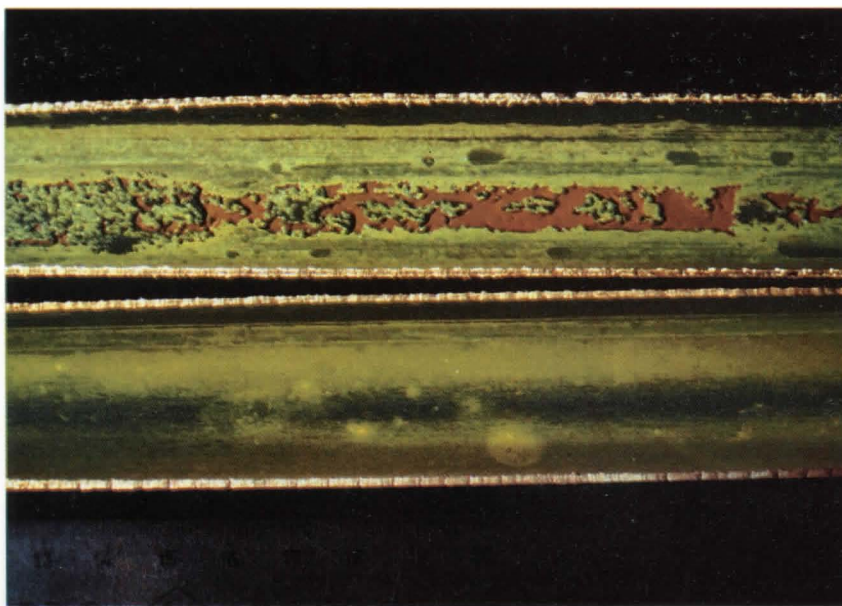


Abb. 13. Gasblasenkorrosion (Erosion) in einer waagerechten Warmwasserzirkulationsleitung aus Kupfer, als Folge zu hoher Wassertemperaturen.