

# Wiederertüchtigung von korrodierten Unterwassermotorpumpen durch Vollbeschichtung

Wasserversorgung, Wassergewinnung, Korrosion, Beschichtung, Wirkungsgrad

Mario Hübner und Peter Janknecht

*Die vorliegende Arbeit beschreibt die erfolgreiche Instandsetzung von durch Oberflächenkorrosion geschädigten Unterwassermotorpumpen mittels Beschichtung, die gleichzeitig zwei Zielen diente: Zum einen wurde der korrodierende Werkstoff durch eine stabile Schutzschicht vom umgebenden Medium abgetrennt und der weitere Korrosionsfortgang aufgehalten. Zum anderen wurden die korrodierten Bauteiloberflächen durch den Beschichtungsauftrag wieder geglättet, was die eingetretenen Strömungsverluste und damit verbundenen Leistungseinbußen kompensierte. Der energetische Wirkungsgrad der Pumpen wurde noch über den Neuzustand hinaus verbessert, womit eine wirtschaftliche Amortisation der Maßnahme sichergestellt war.*

**Englischer Titel fehlt????????????????????**

*Submersible motor pumps, which had previously been damaged by superficial corrosion, have been successfully refurbished by a complete coating with two objectives: Firstly, the corroding materials were protected from the environment and thus further corrosion blocked. Secondly, the corroded surfaces were smoothed in the coating process, thus compensating the losses in flow energy and hydraulic performance. The pumps' energetic efficiency was increased above the original level, which secured the project's economic pay off.*

## 1. Einführung

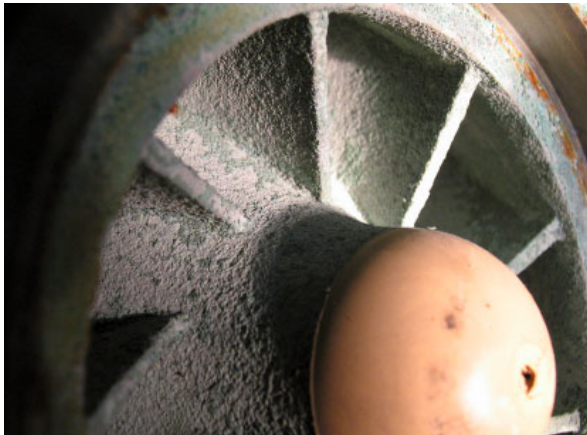
### 1.1 Vorgeschichte

Im Jahr 2006 kam es an neu eingebauten, bronzenen Unterwassermotorpumpen einer Wassergewinnungsanlage der Stadtwerke Düsseldorf AG (SWD) zu starken Korrosionserscheinungen, die aufgrund der vorliegenden Wasserzusammensetzung nicht zu erwarten gewesen waren [1]. Diese führten in kurzer Zeit zu einer hohen Aufrauung der medienberührten Oberflächen und damit zur Erhöhung des Strömungswiderstandes von Laufrädern und Leitgehäusen, wodurch die hydraulische Leistung der Pumpen sowie ihr energetischer Wirkungsgrad deutlich absanken (**Bild 1** und **Bild 2**). Darüber hinaus wurden auch die Spaltringe aus Bronzewerkstoff angegriffen, so dass auf lange Sicht zusätzlich das Auftreten von erhöhten Rückströmverlusten zu erwarten war.

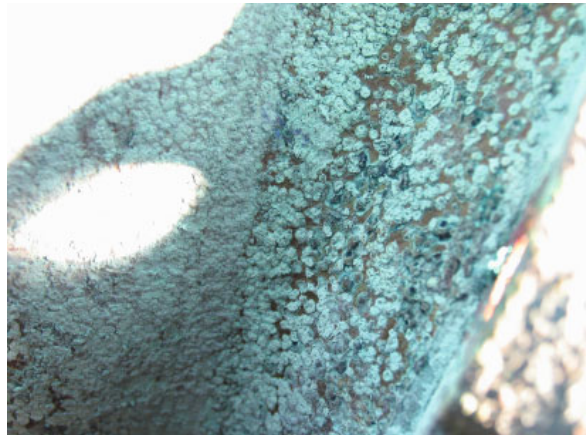
Die betroffenen Aggregate verfügten über keine Drehzahlregelung. Die Korrosionsschäden führten daher zu einem Abfall der Fördermengen um etwa 10%, wodurch die ursprünglich ausgewogene Abstimmung der einzelnen Wassergewinnungsanlagen gravierend gestört wurde. Darüber hinaus erhöhte der um etwa 6 Prozentpunkte verschlechterte Pumpenwirkungsgrad

den spezifischen Stromverbrauch, was jährliche Mehrkosten im vierstelligen Bereich verursachte und somit langfristig nicht tolerierbar war.

Sowohl kavitative als auch elektrokorrosive Zusammenhänge, die als Ursache für die unerwarteten Oberflächenveränderungen in Frage kamen, konnten von den SWD in Eigenleistung durch empirische Untersuchungen sowie Potenzialmessungen an eingebauten Pumpen und an speziell angefertigten Probekörpern ausgeschlossen werden. Eine vom Fachgebiet Werkstofftechnik der Bergischen Universität Wuppertal durchgeführte schadenkundliche Untersuchung nach DIN 50930-6 [2] kam zu dem Schluss, dass die Aufrauungen des eingesetzten Bronzematerials einem chemischen Korrosionsvorgang zuzuschreiben waren [3]. Bezüglich seiner Korrosionsprodukte und deren schichtartigen Aufbau waren Analogien zum Lochkorrosions-Typ I von Reinkupfer festzustellen, aus dem der betroffene Werkstoff zu über 80% besteht [4]. Anzeichen einer werkstoffinhärenten Korrosionsneigung waren nicht nachzuweisen. Als wahrscheinliche Ursache wurden pH-wertabhängige Wechselwirkungen zwischen den Wasserinhaltsstoffen Sauerstoff und Kohlenstoff (TOC) und dem Bronzewerkstoff identifiziert, die einzelnen Faktoren des Korrosionsprozesses konnten



**Bild 1.** Leitapparat aus CuSn10 mit großflächigen farblichen Veränderungen und Aufwüchsen nach einjährigem Betrieb.



**Bild 2.** Aufwüchse (Oberflächenveränderungen) an einem Pumpengehäuse aus CuSn10.

aber im Rahmen der Arbeit nicht abschließend beschrieben werden (siehe [5]).

### 1.2 Praktischer Lösungsansatz

Die gemeinhin als sehr gut bezeichneten Korrosionseigenschaften von Kupferwerkstoffen wie Bronze [6] beruhen im Wesentlichen darauf, dass sich sowohl in natürlichen als auch künstlichen Umgebungsbedingungen auf der Werkstoffoberfläche eine Schutzschicht („Passivierung“) aus primären Korrosionsprodukten wie Kupferoxid ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) aufbaut [7]. Im konkreten Schadenfall deuteten die durchgeführten Untersuchungen darauf hin, dass es in dieser Schutzschicht, durch im System Wasser/Werkstoff begründete Vorgänge, zu lokal begrenzten Schädigungen kommt, die im weiteren Verlauf die beobachteten Aufrauungen in Form einer Lochkorrosion auslösen.

Da die Schäden an in Betrieb befindlichen Wassergewinnungsanlagen aufgetreten waren, bestand von Seiten der SWD neben der Aufklärung der Schadensursache vor allem Interesse daran, die betroffenen Pumpen zum einen zeitnah wieder in einen für den wirtschaftlichen Betrieb geeigneten Zustand zu versetzen und zum anderen ein erneutes Auftreten der beschriebenen Schäden für die Zukunft zu vermeiden.

Die schadenkundliche Untersuchung hatte das System Wasser/Werkstoff als ursächlich für die Korrosion identifiziert, so dass der nächstliegende Lösungsweg in einer entsprechenden Anpassung dieses Systems bestand. Künstliche Veränderungen des geförderten Rohwassers wären jedoch nur bedingt und mit beachtlichem Aufwand zu realisieren gewesen. Außerdem lagen auch nach Abschluss der mehrmonatigen Untersuchungen keine Erkenntnisse darüber vor, welche Parameter dazu in welcher Art hätten verändert werden müssen. Der zweite Systempartner Werkstoff hätte dagegen relativ leicht durch Austausch der bislang aus Bronze bestehenden Pumpenbauteile verändert wer-

den können. Als Alternativmaterialien zu Bronze wurden vom Pumpenhersteller sowohl Gusseisen als auch Chromstahl angeboten. Erstere kamen jedoch insofern nicht in Frage, als Korrosionserscheinungen an diesem Material im Jahre 2006 erst zur Auswahl von Bronze geführt hatten. Der Preis von Bauteilen aus Chromstahl dagegen lag deutlich über den vormaligen Beschaffungskosten der kompletten Pumpen, so dass dieser Umbau wirtschaftlich nicht darstellbar war.

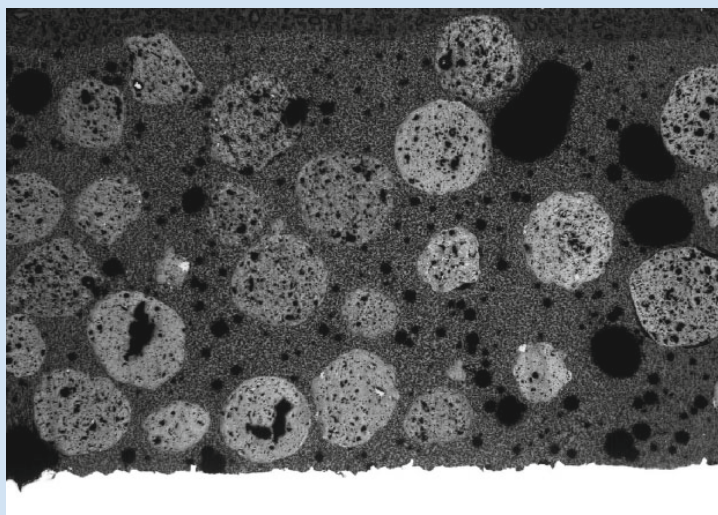
Ein alternativer und am Ende realistischer Lösungsweg bestand darin, die instabile, natürliche Passiv-Schutzschicht der Bronzebauteile durch eine künstliche Beschichtung zu ersetzen. Für diese Vorgehensweise sprach neben den geringeren Kosten auch die Tatsache, dass flüssig aufgetragene Beschichtungen durch die hohen Oberflächenspannungen deutlich glatter werden können als die Gushaut der ursprünglichen Neuteile. Dies führt zu verringerten Strömungswiderständen und -verlusten, so dass der Wirkungsgrad einer Pumpe nicht nur wiederhergestellt, sondern möglicherweise sogar verbessert werden kann.

Aufgrund dieser Gesichtspunkte und der gemachten Erfahrungen waren an das Beschichtungsmaterial folgende Forderungen zu stellen:

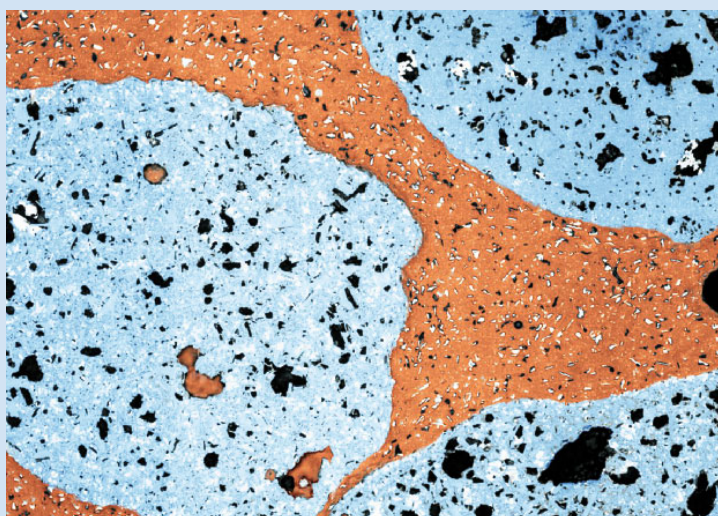
- Hohe Beständigkeit gegen Abrasion und Kavitationserosion, da an den für die hydraulische Leistung der Pumpen besonders kritischen Stellen auch hohe Überströmgeschwindigkeiten vorliegen,
- Beständigkeit im vorliegenden Rohwasser,
- Verträglichkeit mit dem Grundwerkstoff Bronze,
- Gleichmäßige Applizierbarkeit auch in den schlecht zugänglichen, doppelt gekrümmten Schaufeln von Laufrad und Leitgehäuse,
- Gute Fülleigenschaften, um die vorhandenen Aufrauungen auszugleichen sowie
- Geringe Rauheit der fertigen Oberfläche zur Erreichung möglichst niedriger Strömungswiderstände.



**Bild 3.** CERAM beschichteter, scheibenförmiger Probekörper am 21.09.2007.



**Bild 4.** Schliffbild einer Ceram-Beschichtung mit im Polymer eingebetteten Keramikanteilen.



**Bild 5.** Vergrößertes Schliffbild mit Keramikpartikeln (blau) und Polymermatrix (rot).

Aufgrund dieses besonderen Anforderungsprofils wurde seitens der SWD davon Abstand genommen auf bereits eingesetzte und im Rohrleitungsbau seit langem bewährte Beschichtungen aus reinem Polymerwerkstoff zurückzugreifen. Stattdessen erschien eine im Pumpenbereich von der Firma Wilo angewandte und bei Abwasserpumpen bereits bewährte Beschichtung aus der Ceram-Produktfamilie als vielversprechendste Lösung. Hierbei handelt es sich um lösemittelfreie 2-Komponenten-Beschichtungsstoffe auf Epoxydharzbasis, die durch Aluminiumoxid-Anteile auf besondere Abrasions- und Kavitationsfestigkeit hin optimiert wurde und sich damit in besonderer Weise zum Einsatz in hydraulisch stark belasteten Bauteilen von Pumpen eignen.

Als ebenso wichtig wie der Beschichtungswerkstoff selbst war die fachgerechte Untergrundvorbereitung und Applikation desselben einzuschätzen. Hierbei geht es vor allem um die Vermeidung von lokalen Ablösungen der Beschichtung, die den gewünschten Schutzeffekt zunichte machen würden. Auch kommt der Einhaltung einer gleichmäßigen Schichtstärke in den schlecht zugänglichen Strömungskanälen von Laufrad und Leitapparat eine besondere Bedeutung zu, da insbesondere an diesen Stellen eine zu dick aufgebrachte Beschichtung die Geometrie der Strömungskanäle unzulässig verändern und damit zu hydraulischen Unwuchten und Leistungseinbußen führen kann. Da Wilo als Anbieter über langjährige Erfahrung insbesondere bei der Beschichtung von Pumpen verfügt, sprach auch dieser Gesichtspunkt für die Auswahl ihres Ceram-Beschichtungssystems.

## 2. Durchführung

### 2.1 Eignungsprüfung des Beschichtungswerkstoffes

Die konkreten Mechanismen, die den unerwarteten Korrosionsvorgängen an den Pumpenbauteilen zugrunde lagen, waren durch die schadenkundliche Untersuchung nicht abschließend geklärt worden. Um daher letzte Unwägbarkeiten in Bezug auf die Beständigkeit des gewählten Beschichtungswerkstoffes auszuräumen, wurden im Vorfeld empirische Versuche durchgeführt. Hierzu wurden im August 2007 mit Ceram beschichtete, scheibenförmige Probekörper in die betroffenen Brunnen eingebracht und über 15 Monate auf etwaige Veränderungen in der Beschichtung beobachtet, wobei sich keinerlei Werkstoffveränderungen zeigten (**Bild 3**).

Aufgrund dieses Befundes wurde die Firma Wilo im März 2008 mit der Überarbeitung zunächst einer der betroffenen Unterwassermotorpumpen beauftragt, die neben der eigentlichen Aufarbeitung und Beschichtung der korrodierten Bauteile mit Ceram auch den Austausch der Spaltringe gegen solche aus korrosionsbeständigem Material beinhaltete.

## 2.2 Beschichtungsaufbau und -herstellung

Bei der von Wilo angebotenen Ceram-Produktfamilie handelt es sich um ein System aus der Gruppe der Epoxidharzbeschichtungen, das zur Verbesserung der Verschleißbeständigkeit harte, keramische Aluminiumoxidanteile ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) enthält. Die unterschiedlichen Ceram-Produkte unterscheiden sich sowohl durch die eingesetzten Epoxidharze und Härterssysteme, als auch durch Menge, Art und Verteilung der enthaltenen Hartphasen. **Bild 4** und **Bild 5** zeigen exemplarisch die Verbundmatrix mit den im Polymer eingebetteten Keramikanteilen und wurden bereits vor zehn Jahren von einem unabhängigen Werkstofflabor angefertigt. Zwischenzeitlich konnte die Formulierung noch dahingehend optimiert werden, dass zwischen den größeren Aluminiumoxidanteilen kleinere und kleinste Anteile eingelagert sind, wodurch ein Keramikanteil von 85 % erreicht wird. Durch die Art, Größe und Menge der Füllstoffe sowie der Zusätze kann die Konsistenz von Ceram-Beschichtungen variiert werden. Das Aufbringen erfolgt entweder durch Airless-Spritzen, Pinseln oder Spachteln. Die hohe Nasshaftung von über  $15 \text{ N/mm}^2$  gewährleistet eine hohe Abriebfestigkeit.

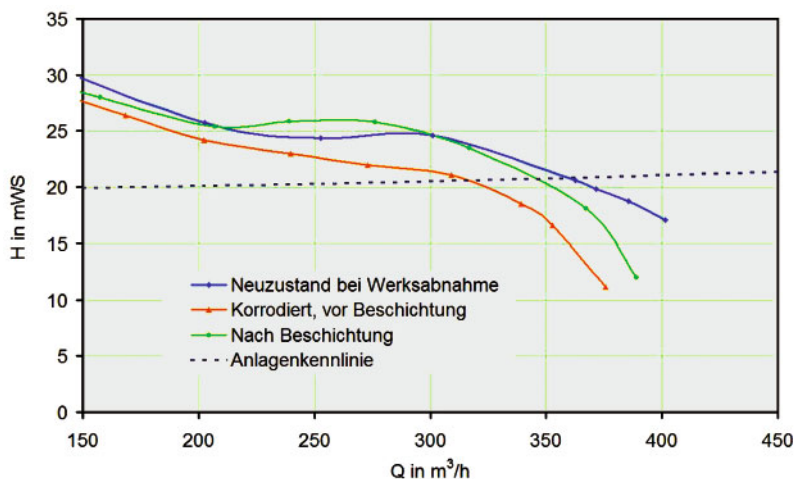
Bei der Auswahl aus der Vielzahl der bei Wilo verfügbaren Ceram-Produkte spielen grundsätzliche Kriterien wie chemische Beständigkeit, geometrische Zugänglichkeit des Bauteils für das Aufbringen der Beschichtung und ihre Bearbeitbarkeit an Dichtflächen und im Spaltbereich eine Rolle. Für den Einsatz im Trinkwasserbereich bietet sich besonders die relativ neue Ceram CT-Beschichtung an, die eine KTW-Zulassung besitzt. Andere Beschichtungen, wie der Typ Ceram C0 gehören zur Gruppe des schweren Korrosionsschutzes, auf die Wilo fünf Jahre Garantie im Seewassereinsatz gewährt.

Zur Oberflächenvorbereitung wird das Bauteil nach SA 2 ½ gestrahlt, entfettet und angeraut. Anschließend wird die Beschichtung mit etwa 400 Mikrometern Schichtdicke im Airlessverfahren aufgetragen oder in stärkeren Schichten von 0,5 mm bis zu 3 mm gespachtelt. Die hierbei erforderliche Sorgfalt bedingt, dass aus Gründen der Zugänglichkeit Bohrlochpumpen erst ab einer Baugröße von 8 Zoll beschichtet werden können.

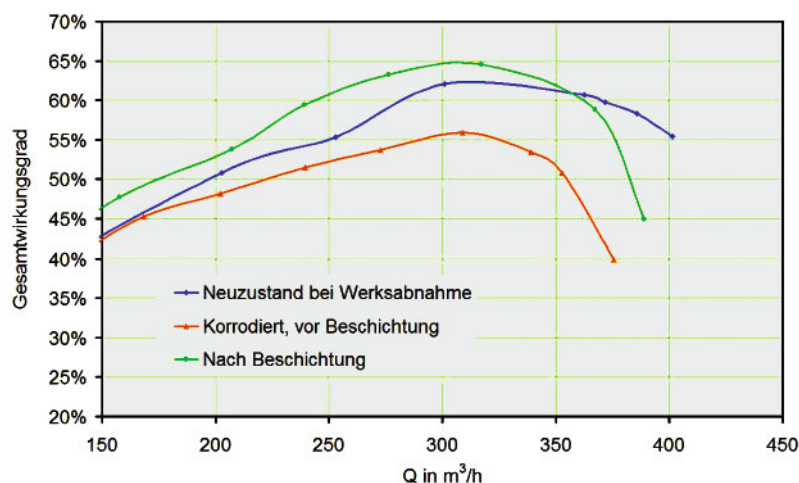
Trotz der hohen Beständigkeit der Beschichtung wird im Einsatz eine regelmäßige (jährliche) Kontrolle der Beschichtung empfohlen, um Schäden am Grundwerkstoff durch rechtzeitige Instandsetzung zu vermeiden.

## 2.3 Ergebnisse

Zur Dokumentation der durch die Ceram-Beschichtung bewirkten Verbesserung wurden auf dem Pumpenprüfstand der Firma Wilo Kennlinien sowohl der im korrodierten Zustand angelieferten als auch der fertig überarbeiteten Pumpe aufgenommen und mit der Kennlinie der Werksabnahme verglichen (**Bild 6** und **Bild 7**).



**Bild 6.** Q-H-Kennlinien einer von Bronzekorrosion betroffenen Pumpe im neuen, korrodierten und beschichteten Zustand sowie Anlagenkennlinie.



**Bild 7.** Wirkungsgrad-Kennlinien einer von Bronzekorrosion betroffenen Pumpe.

### 2.3.1 Hydraulische Auswertung

Aus hydraulischer Sicht zeigen die gemessenen Werte, dass die Leistung der Pumpe weitestgehend wiederhergestellt wurde, wobei sich die Kennlinien-Charakteristik gegenüber dem Neuzustand geringfügig verändert hat:

- Zum einen hat sich der Förderstrom der Pumpe generell leicht verringert, was auf die minimale Reduzierung der freien Strömungsquerschnitte durch die aufgebrauchte Beschichtung zurückzuführen ist (**Bild 6**)
- Dieser Effekt wird jedoch teilweise dadurch ausgeglichen, dass die schon zuvor beschriebene Glättung der Bauteiloberflächen zu einer deutlichen Verringerung der Strömungsverluste geführt hat. Dies geht auch aus dem Gesamtwirkungsgrad im Bestpunkt hervor, der sich gegenüber der Werksabnahme der neuen Pumpen von 62,1 % auf 64,5 % um 2,4 Prozentpunkte verbessert hat (**Bild 7**).

### 2.3.2 Wirtschaftliche Aspekte

In Bezug auf Betriebs- und Sanierungskosten ergibt sich folgendes Bild, bezogen auf eine ständig laufende Pumpe:

- Der durch die Korrosion an Bronzebauteilen hervorgerufene Energie-Mehrverbrauch belief sich pro Jahr auf über 50% des Anschaffungspreises einer der ursprünglichen Pumpen
- Die Kosten der Wiederertüchtigung durch Ceram-Beschichtung einschließlich Überarbeitung der Hydraulik betragen etwa 30% des Anschaffungspreises
- Die jährliche Energie-Einsparung durch Beschichten gegenüber dem korrodierten Zustand belief sich im vorliegenden Fall auf das Doppelte der Beschichtungskosten, so dass sich die Überarbeitung bereits nach einem halben Jahr amortisiert hatte
- Auch im Vergleich zum nicht korrodierten Neuzustand der Pumpe ergeben sich durch die Beschichtung jährliche Energie-Einsparungen in der Größenordnung von zwei Dritteln der Beschichtungskosten, womit sich die Beschichtung in etwa eineinhalb Jahren amortisieren würde.

### 2.3.3 Stabilität der Ceram-Beschichtung

Da für die Haltbarkeit auf korrodierten Bronzeteilen keine Erfahrungswerte seitens SWD vorlagen, wurde die beschichtete Pumpe nach ihrem Einbau im April 2008 bis zum März 2009 einem fast einjährigen Probetrieb unterzogen, bei dem die Förderleistung stabil blieb. Anschließend wurde die Pumpe ausgebaut, demontiert und begutachtet, wobei weder Veränderungen der Oberfläche noch etwaige Unterwanderungen der Beschichtung festgestellt wurden, deren Bildung an den Übergängen von unbeschichteten Passflächen zur Beschichtung teilweise befürchtet worden war. Aufgrund dieser positiven Ergebnisse wurden im Laufe des Jahres 2009 alle fünf verbliebenen, von Bronzekorrosion betroffenen, Unterwassermotorpumpen ebenfalls mit Ceram beschichtet.

## 3. Zusammenfassung

Aufgrund der positiven Erfahrungen, die im vorliegenden Schadenfall gemacht wurden, stellt die Ertüchtigung durch nachträgliches Beschichten eine Möglichkeit zur Wiederherstellung des wirtschaftlichen Betriebs von korrodierten Pumpen dar, die sich bereits kurzfristig amortisieren kann. Besondere Bedeutung bekommt dabei die Wahl eines für die Anwendung geeigneten Beschichtungswerkstoffes sowie die auf Beschichtungs-, Grundwerkstoff und Bauteilgeometrie abgestimmte Applikationsweise.

Je nach vorliegender Situation führt die nachträgliche Beschichtung sogar zu einer Wirkungsgradverbesserung. Unter entsprechenden Betriebsbedingungen amortisieren sich die Kosten der Beschichtung durch die resultierende Stromkosteneinsparung kurz- bis mittelfristig.

## Literatur

- [1] DIN EN 12502-2: Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe – Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeiten; Teil 2: Einflussfaktoren für Kupfer und Kupferlegierungen (Ausgabe DIN EN 12502-2:2005-3). Berlin: Beuth Verlag, 2005.
- [2] DIN 50930-6: Korrosion der Metalle, Korrosion metallischer Werkstoffe im Innern von Rohrleitungen, Behältern, und Apparaten bei Korrosionsbelastung durch Wasser; Teil 6: Beeinflussung der Trinkwasserbeschaffenheit (Ausgabe DIN 50930-6:2001-08). Berlin: Beuth Verlag, 2001.
- [3] *Werrel, M.*: Untersuchung des Korrosionsverhaltens von Kupferlegierungen in Rohwässern der Wasseraufbereitung am Beispiel des Bronzewerkstoffes CuSn12. Bachelorthesis. Oberursel/Wuppertal: Bergische Universität Wuppertal, 2008.
- [4] *Wendler-Kalsch, E. und Gräfen, H.*: Korrosionsschadenkunde. Berlin: Springer-Verlag GmbH, 1998.
- [5] *Werrel, M., Leufen, J., Deuerler, F., Appel, K.-D. und Janknecht, P.*: Untersuchungen zur Korrosion an Bronzebauteilen in Anlagen der Wassergewinnung. *gwf-Wasser|Abwasser* 151 (2010) Nr. 5, S. 500 – 507.
- [6] *Matek, W., Muhs, D., Wittel, H., u.a.*: Roloff/Mattek Maschinenelemente. 14. Auflage. Braunschweig: Friedrich Vieweg & Sohn Verlag, 2000.
- [7] *Bohnsack, G.*: Chemische Aspekte bei der Korrosion des Kupfers. Essen: Vulkan-Verlag, 1997.

Eingereicht: 11.02.2010  
Korrektur: 29.03.2010  
Im Peer-Review-Verfahren begutachtet

## Autoren

### Mario Hübner

E-Mail: Mario.Huebner@wilo.com |  
Manager Product Management  
WILO EMU GmbH |  
Heimgartenstraße 1-3 |  
D-95030 Hof

Dr.-Ing. **Peter Janknecht** (Korrespondenz-Autor)

E-Mail: Pjanknecht@swd-ag.de |  
Stadtwerke Düsseldorf AG |  
Abteilung Wassertechnik |  
Himmelgeister Landstraße 1 |  
D-40589 Düsseldorf