

Einsatz thermisch gespritzter Schichten in Wasserturbinen

Oberflächen für längere Lebensdauer und höhere Energieeffizienz

Wasserkraft liefert einen wichtigen Beitrag zum Ausbau der erneuerbaren Energien. Die Beschichtungen von Sulzer Metco schützen viele Bauteile von Wasserturbinen vor Erosions- und Korrosionsschäden und leisten somit einen Beitrag für eine sichere, ökonomische und umweltfreundliche Energieversorgung.

Gemäß der Studie *World Energy Outlook 2010* der *International Energy Agency* wird der Primärenergiebedarf der Welt 2035 um 35% höher sein als 2008. Die Gründe sind die steigende Weltbevölkerungszahl und der zunehmende Wohlstand vor allem

in den Schwellenländern. Der Anteil am Gesamtbedarf der unterschiedlichen Primärenergieträger wird sich jedoch verschieben. Die Studie sagt eine Erhöhung des Ölkonsums um ca. 20% voraus, also deutlich unterdurchschnittlich. Gas, Wasser und andere erneuerbare

Energien werden in allen Ländern zunehmen [1]. Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung wird von 19% im Jahre 2008 auf 32% im Jahre 2035 steigen. Nach der Nuklearkatastrophe in Fukushima im März 2011 und der Atom-Ausstiegserklärung von

Stausee eines Wasserspeicherkraftwerks in den Alpen.



© Prochasson Frederic | Dreamstime.com

einigen führenden Industrienationen ist jedoch davon auszugehen, dass das Wachstum bei den erneuerbaren Energien noch wesentlich stärker sein wird als im Jahr 2010 vorausgesagt.

Eine der umweltfreundlichsten Arten der Energiegewinnung stellt die Nutzung der Wasserkraft dar, wobei zwischen Laufwasser-, Speicher- (z.B. Talsperren) und Pumpspeicherkraftwerken unterschieden wird. Während die Laufwasserkraftwerke direkt in den Flusslauf integriert sind und ständig Energie erzeugen, dienen die Pumpspeicherkraftwerke auch der Energiespeicherung.

Zwischenlagerung der Energie

Dieser Funktion kommt in der heutigen Zeit eine immer größere Bedeutung zu. So hat Deutschland heutzutage eine Pumpspeicherleistung von etwa 7 GW (Gigawatt) mit einer Nutzungsdauer von täglich 4–8 Stunden installiert. Daraus ergibt sich eine beachtliche Gesamtspeicherkapazität von etwa 40 GWh. Weitere Projekte werden diese Kapazität in der Zukunft noch deutlich erhöhen. Ein weiterer Vorteil von Pumpspeicherkraftwerken ist, dass sie einen hohen Wirkungsgrad aufweisen, d.h., die überschüssige elektrische Energie kann mit einem Gesamtwirkungsgrad von 80% zwischengelagert werden.

Je nach Art des Kraftwerkes bzw. der Turbinenbauart (Francis-, Kaplan- oder Pelton turbine) [2] sowie den spezifischen Einsatzbedingungen (z.B. das Korrosionspotenzial und die Beladung des Wassers mit feinem Sand, Geröll und Steinen) werden die Kraftwerke – und hier insbesondere die Turbinen – unterschiedlich durch Erosion (Hydroabrasion; Flüssigkeitserosion und Kavitationserosion sowie Korrosion) belastet [3].

Das erste Wasserkraftwerk zur Stromgewinnung wurde 1880 im englischen

Northumberland errichtet. Die hohe Beanspruchung der Schaufeln durch Korrosion und Erosion führte damals dazu, dass die Turbinen aus teurem hochlegierten Stahlguss hergestellt wurden. Unterscheiden sich die heutigen Kraftwerke inzwischen deutlich von dem im Northumberland und haben Hilfsmittel wie die Computermodellierung dazu beigetragen, den Anteil von Kavitation durch optimiertes Bauteildesign zu minimieren, so ist dennoch die Gesamtbelastung der Turbinenbauteile gestiegen.

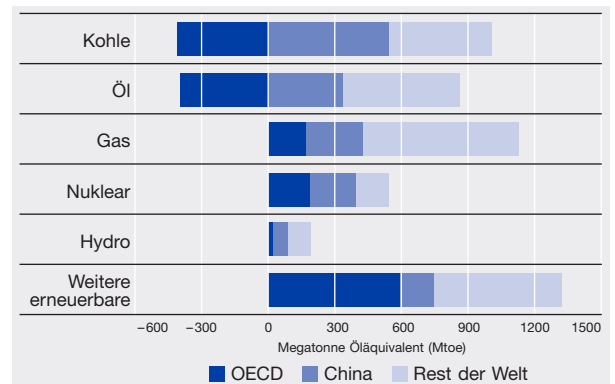
Dies ist nicht zuletzt auf das Bestreben zurückzuführen, höhere Wirtschaftlichkeit zu erzielen, größere Fallhöhen auszunutzen, verstärkt Staustufen in schwer zugänglichen Gebirgsregionen, z.B. dem Himalaya oder in den Anden, auszubauen, schneller drehende kleine, aber auch große «Monster»-Turbinen und Kraftwerke an stark sand- und chemisch belasteten Flüssen zu bauen.

Da auch gleichzeitig die Erwartung an die Lebensdauer, den Abstand der Revisionszyklen und die über den Revisionszyklus erreichbaren höheren Wirkungsgrade ständig steigen, kommt dem Verschleißschutz der Kraftwerkskomponenten eine immer größere Bedeutung zu.

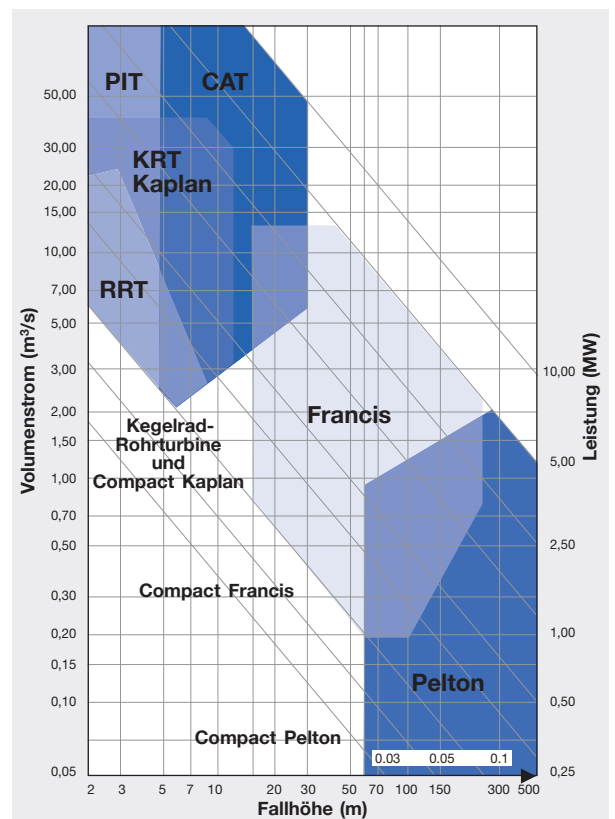
Längere Lebensdauer von Wasserturbinen durch Schichtlösungen von Sulzer Metco

Die Namen Sulzer und Metco sind seit langem eng mit dem Bereich der Wasserkraft verbunden. So wurden von Metco in den USA bereits in den 1930-er Jahren Stähle, Chromstähle, Bronze, Zink und Blei versuchsweise an Francislaufrädern zum «Kavitationstest» aufgebracht.

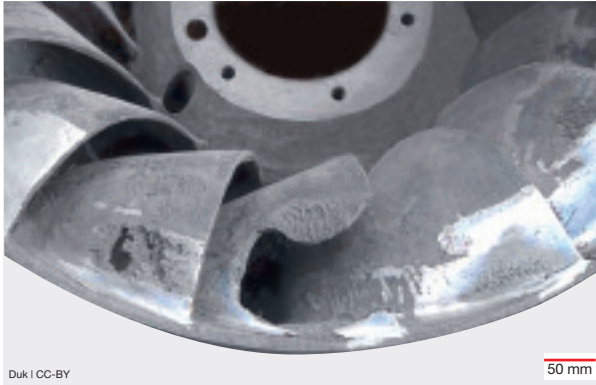
Auch in Deutschland und Österreich wurden in den 1960-ern, z.B. in den Innkraftwerken, Versuche gegen Abrasion



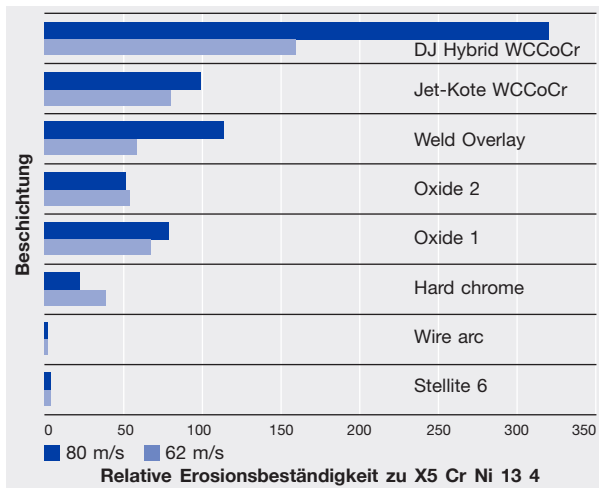
[1] Wachstum des Primärenergieverbrauchs nach Technology von 2008 bis 2035. (Quelle: OECD / IEA World Energy Outlook 2010)



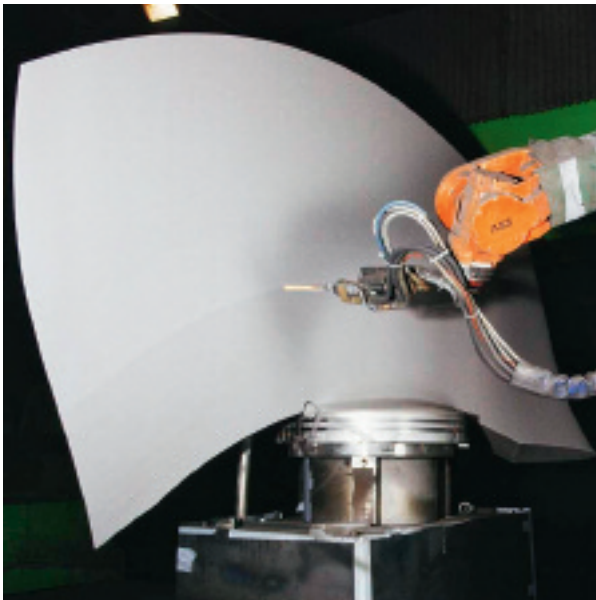
[2] Einsatzfelder von Wasserturbinen. (Quelle: Katalog Sulzer Hydro / Sulzer Escher Wyss)



3 Kavitationsschaden an einer Francisturbine.



4 Erosionsbeständigkeit verschiedener Werkstoff- und Schichtsysteme.



5 Schaufel einer Kaplanmaschine, beschichtet mit SUME™Turb von Sulzer Metco.

an Kaplanmaschinen mit Metcoloy 2 (13% Chromstahl; Draht) durchgeführt und später mit Erfolg eingesetzt. Drahtflammspritzen wurde so im Turbinenbetrieb zur Standardtechnologie in der Anlagenerhaltung und wird seit dieser Zeit an fast allen Wasserturbinentypen mit Erfolg eingesetzt. Gegenüber dem bis dahin üblichen Auftragsschweißen hatte es vor allem die Vorteile einer wesentlich verkürzten Beschichtungszeit und einer geringeren Wärmebelastung des Grundwerkstoffes der Komponenten aufzuweisen.

Erfolgreiche Einführung

Ende der 1980-er Jahre führte Metco die neue Hochgeschwindigkeits-Flammspritzanlage Diamond Jet ein (HVOF). Durch ihre einfache Konstruktion war diese neue Technologie werkstattgerecht und für den täglichen Einsatz geeignet. Erste Versuche an Schonhülsen waren sehr erfolgversprechend, und so erweiterte sich sehr schnell das Teilespektrum, auf welches z.B. Wolframkarbid-schichten vom Typ WCCoCr aufgespritzt wurde. Die erreichten Standzeiten übertrafen die kühnsten Erwartungen.

So wurde der Materialabtrag um den Faktor 50 gegenüber einem Turbinenbaustahl (1.4313) vermindert. Der teilweise Übergang von den bis dahin üblichen extrem dicken Schichten (z.B. 10 mm dickes drahtflammspritztes Metcoloy 2) zu den wesentlich dünneren – allerdings auch wesentlich erosionsbeständigeren – HVOF-gespritzten karbidischen Schichten wurde dadurch eingeleitet. In 4 ist das Verschleißverhalten von verschiedenen Oberflächenbeschichtungen vergleichend dargestellt, wobei die dominante Position des Hochgeschwindigkeits-Flammspritzens (mit WCCoCr als Beschichtungsmaterial) deutlich wird.

Bahnbrechende Schichtentwicklungen

Nicht zu vergessen sind auch die bahnbrechenden Schichtentwicklungen und Modellierungsarbeiten, die in den 1990-er Jahren in Zusammenarbeit von Sulzer Innotec, Sulzer Hydro und Sulzer Metco in diesem speziellen Anwendungsbereich erfolgten. Ein Beispiel hierfür ist die Entwicklung der Schicht SUME™Turb speziell für Kaplansturbinenschaufeln 5. Diese Schicht vom Typ WCCoCr wird mit dem Sulzer-Metco-HVOF-Brenner Diamond Jet erzeugt, wobei die Schichtdicke bis zu 400 µm betragen kann.

Auch bei Francis- und Pelton-turbinen wird ein großer Teil der Wasserführenden Teile beschichtet. Einige Bauteile, wie z.B. Labyrinthdichtungen an Francismaschinen, werden dabei «spritzgerecht» (geteilt) konstruiert. In der Mehrzahl der Einsatzfälle können die beschichteten Bauteile dann ohne weitere Nacharbeit eingesetzt werden.

Bewährte Werkstoffe

Abbildung 6 gibt einen Überblick über die häufigsten und üblicherweise eingesetzten Schichtsysteme in den verschiedenen Wasserturbinen.

Typische Sulzer-Metco-Standardwerkstoffe des Typs WCCoCr, die sich in diesem Bereich je nach Beanspruchung und konkretem Einsatzfall sowie gewählter HVOF-Anlage bewährt haben, sind Diamalloy 5849, Amdry 5843, Sulzer Metco 5847, Woka 3652, Woka 3653 und SUME™Turb. Trotz praktisch gleicher chemischer Zusammensetzung unterscheiden sich diese Werkstoffe durch Form, Morphologie, Korngrößenverteilung, Größe der Primärkarbide, Schüttdichte und damit von der Herstellung und den Herstell-Parametern und auch dem eingesetzten Ausgangsmaterial.

Diese Unterschiede machen sich in den Ergebnissen der Verschleißtests

deutlich bemerkbar [7]. Allein durch die üblicherweise zur Qualitätssicherung herangezogene Schichthärte waren diese Unterschiede nicht zu erkennen.

Es wird ersichtlich, dass im Wasserturbinenbau heute praktisch nur noch das Hochgeschwindigkeits-Flamm-spritzen (nur in der Werkstatt; mit den Brennern Diamond Jet, WokaStar oder WokaJet) oder das Drahtflammspritzen (in der Werkstatt oder auch Vor-Ort-Beschichtung; mit den Spritzpistolen 14E oder 16E bzw. EGD-K) eingesetzt werden. Das Plasmaspritzen hat dagegen in diesem Bereich weitgehend an Bedeutung verloren (früher: Düsenadeln, Mundstücke und Francis-turbinenteile).

Unterstützende Entwicklung

Eine generelle Empfehlung von Schicht-lösungen kann es ohne genaue Analyse des konkreten Einsatzfalles – wie bei den meisten Maschinenbauteilen – nicht geben. In Abhängigkeit vom Design der Maschine, von der konkreten Betriebsweise und den spezifischen Betriebsbedingungen können starke Unterschiede in den jeweiligen dominanten und sich überlagernden Beanspruchungsmechanismen vorherrschen.

Dabei kann es im ungünstigsten Fall auch dazu kommen, dass sich Beanspruchungen gegenseitig verstärken. Im Allgemeinen kann aber davon ausgegangen werden, dass der Verschleiß durch Hydro-Abrasion, Korrosion und Kavitation mit der Strömungsgeschwindigkeit, dem Feststoffgehalt und dem Korrosionspotenzial der Flüssigkeit zunimmt. Da der Verschleiß im Betrieb jedoch von weiteren Faktoren wie der Größe, der Form und der Härte der Feststoffpartikel abhängt, können spezifische Grenzen für einzelne Werkstoffe nicht angegeben werden.

| Kaplanturbine | | | |
|-----------------------|--|--|--|
| Bauteil | Beschichtungsbereich | Schicht | Beanspruchung |
| Laufradmantel | zwischen Leitschaufelring über Kugelbereich bis zum Saugrohr | • Drahtflammspritzen / 15 mm Metcoloy 2 | Erosionsverschleiß (Hydro-Abrasion; Flüssigkeitserosion) |
| Kaplanflügel | Teilbereiche bzw. ganzer Flügel | • HVOF / 0,4 mm WCCoCr • Drahtflammspritzen / 5 mm Metcoloy 2 | |
| Leitschaufelring | Planfläche über Radius bis Laufradmantel | • Drahtflammspritzen / 5 mm Metcoloy 2 | |
| Schonbüchse | 2-teilige Dichtungselemente | • HVOF / 0,3 mm WCCoCr • Drahtflammspritzen / Metcoloy 2 | Dichtungsbereich, Abrasionsverschleiß |
| Radiallager | Neufertigung und Reparatur | • Drahtflammspritzen / Sprababbitt A | Gleitverschleiß |
| Kurbel | Gleitlagerbereich | • Drahtflammspritzen / Sprasteel-LS | |
| Kurbelzapfen | Gleitlagerbereich | • Drahtflammspritzen / Sprasteel-LS | |
| Francisturbine | | | |
| Schutzwand | kompl. über Leitschaufelbohrungen | HVOF / WCCoCr | Erosionsverschleiß (Hydro-Abrasion; Flüssigkeitserosion) |
| Leitschaufel | Blatt komplett, auch Teller und Stirnseiten bis Dichtung | | |
| Turbinendeckel | Spalt- und Labyrinthbereich, Bereich der Verschleißbringe | | |
| Lauftrad | Spalt und Labyrinthbereich, Schaufel-Wassereintrittskanten | | |
| Peltonturbine | | | |
| Peltonbecher | Innenseite und über Nebenschneiden | HVOF / WCCoCr | Erosionsverschleiß (Hydro-Abrasion; Flüssigkeitserosion) |
| Düsennadel | Verschleißbereich bis Anzugsbohrungen | • HVOF / WCCoCr • Plasma / Cr ₂ O ₃ | |
| Nadelführung | Verstellbereich | Drahtflammspritzen / Metcoloy 2 / Sprabronze | Gleitverschleiß |
| Mundstücke | Gesamte Innenkontur | HVOF / WCCoCr | Erosiver & abrasiver Verschleiß |
| Mundstück Einsatzring | Verschleißbereich | | |
| Strahlabweiser | Verschleißbereich | | |
| Strahldach | Verschleißbereich | | |

[6] Auswahl der wichtigsten Anwendungen für thermisch gespritzte Schichten im Wasserturbinenbau.

Weil das Verschleißverhalten eines Werkstoffs nicht mithilfe seiner einfachen physikalischen und mechanischen Kenngrößen wie Härte, E-Modul oder Zugfestigkeit vorhergesagt werden kann, ist die Durchführung spezieller Verschleißtests notwendig. Während phänomenologische Tests eingesetzt werden, um das grundlegende Verschleißverhalten eines Werkstoffs unter klar definierten Belastungen zu bestimmen, werden anwendungsspezifische Tests bereits auf Komponenten und konkrete Einsatzfälle ausgelegt. Die Ergebnisse dieser Versuche können in der Regel direkt in eine Anwendung übergeführt werden¹.

Prüfstände für die Schichtentwicklung

Sulzer Metco ist gemeinsam mit dem Partner Sulzer Innotec mit Prüfständen sowohl für die phänomenologischen Untersuchungen als auch für die kunden- und anwendungsspezifische Schichtentwicklung voll ausgestattet. Im Einzelnen stehen derzeit folgende Prüfstände zur Verfügung:

- Kavitations-/Erosionsprüfstand (gemäß ASTM G32-03)
- Abrasionsprüfstand gemäß ASTM G65 (dry sand rubber wheel)
- Abrasions-/Korrosionsprüfstand (modifizierter ASTM-G65-Test)
- Salzsprühtest gemäß ASTM B117; auch geeignet für ASTM G85, B368, G43, D2247
- Prüfstand für Stromdichte-Potenzialmessungen
- GE-Erosionstest (GE50TF121)
- Taber Abraser gemäß ASTM G75
- 2-Körper-Block-auf-Ring-Test (Verschleißverhalten von Reibpaarungen unter Gleitreibung)
- Wasserstrahl-Erosions-Test

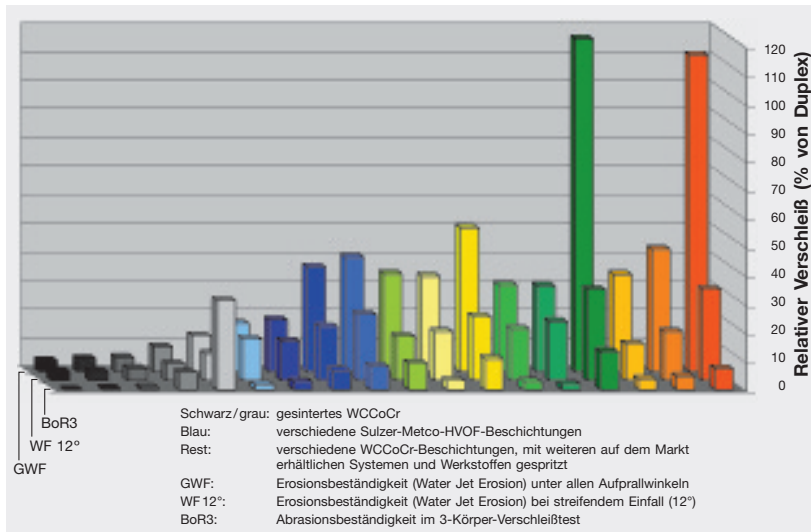
Sulzer Metco bietet seine Fachkompetenz sowie die oben genannten Prüfstände an, um kundenspezifische Applikationen zu entwickeln. Hier kann z.B. festgestellt werden, welche der zur Verfügung stehenden Schichtsysteme für eine gegebene Beanspruchung am besten geeignet ist. Um z.B. speziell das Kavitationsverhalten einer HVOF-gespritzten



8 Kavitationsprüfstand bei Sulzer Metco.

Schicht beurteilen zu können, wird bei Sulzer Metco ein spezieller Kavitationsprüfstand eingesetzt 8.

Sulzer Metco bietet seinen Kunden in enger und vertraulicher Zusammenarbeit an, aus einer ganzen Anzahl von bereits existierenden Schichten die beste Lösung auszuwählen bzw. eine vorhandene Schicht aufgrund spezieller Anforderungen in der Turbine gemeinsam weiter zu entwickeln.



7 Verschleißverhalten von WCCoCr.

Dank

Die Autoren bedanken sich bei Hans Rinnergschwentner für seinen wertvollen Beitrag.

Hans-Michael Höhle
 Sulzer Metco Europe GmbH
 Spreestraße 2
 65451 Kelsterbach
 Deutschland
 Telefon +49 172 6212 735
 hans-michael.hoehle@sulzer.com

Montia C. Nestler
 Sulzer Metco (US) Inc.
 1101 Prospect Ave.
 Westbury, NY 11590-0201
 USA
 Telefon +1 516 338 2305
 montia.nestler@sulzer.com

Literaturhinweise

¹ Kränzler, Thomas: *Sicherstellung der Produktqualität durch maßgeschneiderte Materialtests – Klassifizierung von Werkstoffen.* Sulzer Technical Review 1/2010