

# KORROSIONSUNTERSUCHUNGEN AN EINEM ERHITZERKOPF EINER STIRLINGMASCHINE

Daniel Pöcher, OTH Amberg-Weiden  
 Lenz Pittroff, OTH Regensburg  
 Michael Elsner, OTH Regensburg  
 Stefan Beer, OTH Amberg-Weiden

20

Die Kraft-Wärme-Kopplung basierend auf dem Brennstoff Biomasse ist ein technologisch äußerst anspruchsvolles Aufgabengebiet. Ein mögliches Arbeitsprinzip einer KWK-Anlage stellt der Stirlingmotor dar. Zur Durchführung von Korrosionsuntersuchungen wird der Erhitzerkopf einer an der OTH Regensburg entwickelten Stirlingmaschine aus verschiedenen Werkstoffen mit unterschiedlichen Beschichtungen gefertigt. Der Erhitzerkopf wird in den Abgasweg der Heißluftgasturbinenanlage im Biomasseheizkraftwerk Hersbruck integriert und den heißen Rauchgasen ausgesetzt. Nach Beendigung des Versuchsbetriebs werden Korrosionsuntersuchungen an der OTH Amberg-Weiden durchgeführt.

## AUSLEGUNG UND FERTIGUNG DES ERHITZERKOPFES

Der zur Durchführung der Korrosionsversuche verwendete Erhitzerkopf wird in Anlehnung an den Wärmetauscher der neuentwickelten Gamma-Typ-Stirlingmaschine hergestellt. Während der Erhitzerkopf der Neuentwicklung einheitlich aus unbeschichtetem X10CrNiAlTi32-20 besteht, ist der hier vorgestellte Wärmetauscher aus insgesamt 44 Rohren aus acht unterschiedlichen Material- und Beschichtungsvarianten aufgebaut. Die Auswahl der verwendeten Stähle wird unter Berücksichtigung der Forderung nach Hochtemperaturbeständigkeit gegen eine Arbeitstemperatur von bis zu 1.100 °C, Beständigkeit gegen korrosiv wirkende Rauchgase, guter Wärmeleitfähigkeit sowie guten Schweißeigenschaften getroffen. Für die Integration in den Abgasweg der Heißluftgasturbinenanlage wird die Konstruktion des Erhitzerkopfes um einen Befestigungsflansch erweitert. Zur realistischen Simulation der Arbeitsbedingungen eines Stirlingmotors wird zusätzlich eine Zu- und Ablaufstrecke zur Druckbeaufschlagung einschließlich Messvorrichtungen zur Bestimmung von Druck und Temperatur integriert. Die Erhitzerkopfröhre werden in der hochschuleigenen Werkstatt der OTH Regensburg gebogen und anschließend beschichtet. Die Schweißarbeiten an der gesamten Erhitzerkopfbaugruppe werden unter Beaufsichtigung durch die OTH Regensburg extern durchgeführt.

## DURCHFÜHRUNG DER VERSUCHE

Der in Abbildung 1 gezeigte Erhitzerkopf ist mit Wärmeübertragerrohren aus verschiedenen Materialien bestückt. Als Vergleichswerkstoff dient ein zunderbeständiger, kriechfester und schweißbarer Vollaustenit (1.4841 bzw. X15CrNiSi25-2), dessen Anwendungstemperaturen zwischen 900 und 1.100 °C liegen. Dieser Standardhochtemperaturstahl stellt auch preislich die günstigste Variante im Vergleich dar. Er dient als Basis für Varianten mit Funktionsschichten. Die Beschichtung erfolgte durch die Rhein-Ruhr-Beschichtungsservice GmbH. Die Lasernachbearbeitung zum „Abdichten“ der Beschichtungsoberfläche erfolgte im Labor für Lasertechnik der OTH Amberg-Weiden (Leitung: Prof. Dr. Andreas Emmel), wo die Werkstoffuntersuchungen durchgeführt wurden.

### Die gewählten Kombinationen von Werkstoff und Beschichtung waren wie folgt:

- Werkstoff 1.4876H, keine Beschichtung
- Werkstoff 1.4841, keine Beschichtung
- Werkstoff 1.4841, Beschichtung mit NiCrAlY – ZrO<sub>2</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, keine Lasernachbearbeitung
- Werkstoff 1.4841, Beschichtung mit NiCr – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, keine Lasernachbearbeitung
- Werkstoff 1.4841, Beschichtung mit NiCrAlY – ZrO<sub>2</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, keine Lasernachbearbeitung
- Werkstoff 1.4841, Beschichtung mit NiCrAlY – ZrO<sub>2</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Lasernachbearbeitung
- Werkstoff 1.4841, Beschichtung mit NiCr – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Lasernachbearbeitung
- Werkstoff 1.4841, Beschichtung mit NiCrAlY – ZrO<sub>2</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Lasernachbearbeitung

Der Prüfling wurde im Biomasseheizkraftwerk Hersbruck (Biomassegegenstromvergasung mit Heißluftgasturbinenprozess und ORC-Anlage) zwischen Brennkammer und Wärmeübertrager eingebaut. Die Gaszusammensetzung entspricht der einer konventionellen Biomasseverbrennung, allerdings bei einem Temperaturniveau von 1.000-1.100 °C. Durch die Besonderheit der Gegenstromvergasung liegt der Staubgehalt im Rauchgas bei unter 1 mg/m<sup>3</sup> bei 11 % Sauerstoffgehalt. Der

Foto: Autoren



Abb. 1: Prüfling zu Beginn und am Ende des Dauertests

Prüfling wurde von Frühjahr bis Herbst 2014 über 2.617 Stunden einem Temperaturmittelwert von ca. 1.030 °C ausgesetzt. Zur Durchführung des Dauerversuchs wurde ein vollautomatisierter Prüfaufbau an der OTH Amberg-Weiden konzipiert, aufgebaut und mit Messtechnik ausgestattet. Die Messdaten waren jederzeit via Internet abrufbar, was eine permanente Fernüberwachung ermöglichte. Zur Kühlung des Prüflings wurde kontrolliert Druckluft in die Rohre eingeleitet, die sich im Mittel auf 640 °C aufheizte. Das Druckniveau betrug hierbei ca. 12 bar. Am Ende der Versuchsperiode wurden im Labor für Werkstofftechnik der OTH Amberg-Weiden Schliffbilder der verschiedenen Wärmetauscherrohre angefertigt (Abbildung 2). Unter dem Lichtmikroskop konnten die Zunderschichtdicken vermessen werden und daraus für den jeweiligen Werkstoff ein parabolisches Zundergesetz abgeleitet werden. Deutlich zu erkennen ist, dass die Oxidation bevorzugt Korngrenzen angreift. Hierdurch ist auch zu erklären warum sich die Oberfläche des Werkstoffs aufraut bzw. sich kleine Grübchen bilden.

Grafik: Autoren

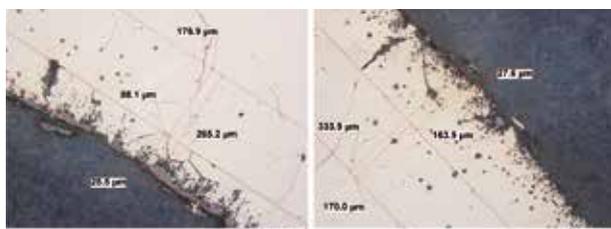


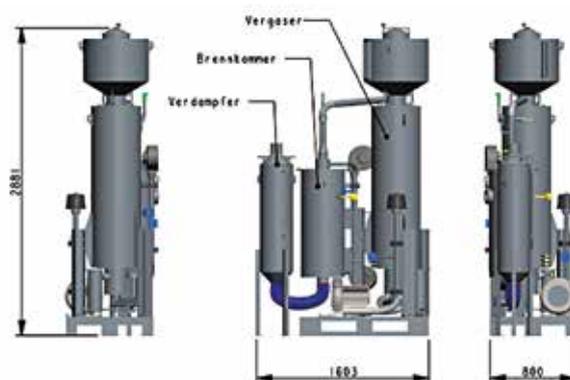
Abb. 2: Schliffbild des Werkstoffs 1.4841 mit Dicke der Zunderschicht innen (links) und außen (rechts) am Rohr

### ERGEBNISSE

Als Ergebnis der Untersuchung kann festgehalten werden:

- Der Werkstoff 1.4841 ohne Beschichtung weist keine stärkere Oxidation auf als die anderen Varianten und stellt damit im Vergleich die wirtschaftlichste Variante dar.
- Die Funktionsschichten mit und ohne Lasernachbehandlung haben sich als nicht ausreichend dicht erwiesen, sodass sie den darunterliegenden metallischen Werkstoff nicht gegen Korrosionsangriff schützen konnten. Teilweise sind die Schichten auch abgeplatzt.
- Mithilfe des parabolischen Zundergesetzes kann man die Abzehrung des Werkstoffs unter den gegebenen Bedingungen verlässlich abschätzen.
- Bei ausreichender Anfangsstärke der Rohrwanddicke ist eine Lebensdauer des Wärmeübertragers von mehreren 10.000 Stunden unter den gegebenen Randbedingungen problemlos erreichbar.

Im nächsten Arbeitsschritt wird ein an der OTH Regensburg entwickelter Stirlingmotor in den KWK-Prüfstand der OTH Amberg-Weiden integriert. Der Prüfstand (vergleiche Abbildung 3) ist so konzipiert, dass in etwa gleiche Gaszusammensetzung, Temperatur und Staubgehalt herrschen wie beim Test im Biomasseheizkraftwerk Hersbruck.



Grafik: Autoren

Abb. 3: KWK-Prüfstand für Stirlingmotoren der OTH Amberg-Weiden

Im Vergleich zur konventionellen Vorgehensweise der Beaufschlagung eines Stirlingerhitzerkopfes mit den Rauchgasen einer Biomasseverbrennung mit den üblichen brennstoffabhängigen Staubgehalten von ca. 20...1000 mg/m<sup>3</sup> sollen durch das neuartige Prinzip mit extrem niedrigen Staubwerten (< 1 mg/m<sup>3</sup>) das Korrosionsverhalten und das Fouling am Wärmeübertrager deutlich verbessert werden.

#### Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Stefan Beer,  
OTH Amberg-Weiden  
s.beer@oth-aw.de

+49 9621 482-3304

Prof. Dr.-Ing. Michael Elsner,  
OTH Regensburg  
michael.elsner@oth-regensburg.de

+49 941 943-5154

#### Projektmitarbeiter

Lenz Pittroff, B. Eng., OTH Regensburg  
lenz1.pittroff@oth-regensburg.de

Daniel Pöcher, M. Eng., OTH Amberg-Weiden  
da.poecher@oth-aw.de

#### Geldgeber

- TWO – Technologie- und Wissenschaftsnetzwerk Oberpfalz
- KWK-Kompetenzzentrum der OTH Amberg-Weiden

#### Projektlaufzeit

39 Monate