

Bayerische
Forschungsstiftung



J A H R E S B E R I C H T

2019

Faseroptische Hochtemperatursensornetzwerke

Das High-Temp-Net-Projekt liefert Innovationen für die Weiterentwicklung großtechnischer Anlagen

Gasturbinen und chemische Reaktoren werden auch für die Zukunft der Energieerzeugung und des Anlagenbaus von großer Bedeutung bleiben und weiterhin Schlüsseltechnologien darstellen. Während Festbettreaktoren die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen nach dem Power-to-X-Prinzip ermöglichen, erzeugen Gasturbinen aus den Brennstoffen wiederum elektrische Energie und Wärme. Zur Effizienzsteigerung und technischen Weiterentwicklung dieser Anlagen besteht ein Bedarf an einer neuen Sensortechnik, welche eine Erfassung von sehr hohen Temperaturverteilungen mit hoher Messpunktdichte bei geringem Verkabelungs- und Platzbedarf ermöglicht. Hier bietet die Technologie der faseroptischen Sensorik auf Basis von regenerierten Faser-Bragg-Gittern (RFBG) eine Lösung, da sie die Integration einer Vielzahl von Messstellen in eine einzige optische Faser erlaubt und somit Innovationsimpulse für die Weiterentwicklung großtechnischer Anlagen liefert.

In Gasturbinen (Abbildung 1) wird der Brennstoff (z. B. Methan oder Wasserstoff) in azimuthal angeordneten Brennkammern verbrannt, wobei Temperaturen bis 1400 °C entstehen. Durch Verschmutzungen an den Einspritzdüsen kann es zu einer räumlich ungleichmäßigen Verbrennung und damit einer Überhitzung und Beschädigung der Turbinenschaufeln kommen. Lokale Temperaturüberschreitungen müssen deshalb unbedingt vermieden werden. Gleichzeitig steigt die Effizienz einer zur Stromerzeugung genutzten Gasturbine, wenn diese möglichst nahe an ihrer maximal möglichen Grenztemperatur betrieben werden kann. Um dies zu ermöglichen, müssen möglichst viele Betriebsparameter, wie z. B. die Temperaturverteilung innerhalb der Turbine, bekannt sein. Hierzu wird z. B. die Temperaturverteilung im Abgasstrahl der Turbine, wo die Temperaturen 500 °C – 700 °C betragen, mit hoher räumlicher Auflösung gemessen. Damit wird auf die Temperaturverteilung in den

Brennkammern und anderen Segmenten der Turbine zurückgeschlossen. Durch die Messung der Abgastemperaturverteilung kann die Einspritzung in die Brennkammer nachgeregelt und eine möglichst homogene Temperaturverteilung innerhalb der Turbine erreicht werden. Das steigert die Effizienz und Lebensdauer der Turbine, und es werden Kraftstoff- und Materialressourcen geschont.

Festbettreaktoren sind in der chemischen Industrie sehr verbreitet und werden für die Durchführung heterogener Katalyseprozesse zur Herstellung von Basischemikalien wie Methanol, Phthalsäureanhydrid (PSA) oder Maleinsäureanhydrid (MSA) genutzt. Ein weiteres Anwendungsgebiet von stark zunehmender Bedeutung liegt in der industriellen Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen nach den Power-to-Gas- und Power-to-Liquid-Prinzipien. Eine typische Bauform katalytischer Festbettreaktoren sind Rohrreaktoren (Abbildung 2), wobei die meist gas-

Abbildung 1: Gasturbine der 6 MW Klasse
(Foto: MAN Energy Solutions SE,
Turbomachinery Oberhausen)



Abbildung 2: Testreaktor
(Foto: MAN Energy Solutions SE,
DWE-Reactors Deggendorf).



förmigen Edukte durch mit Katalysator-Granulat gefüllte und von einem Kühlmedium umströmte Reaktionsrohre fließen und dabei zu den gewünschten Produkten reagieren. Diese Reaktionsrohre sind in der Regel mehrere Meter lang, und die Anzahl kann von einem Rohr in Pilotreaktoren (Abbildung 2) bis zu mehreren zehntausend Rohren in sogenannten Rohrbündelreaktoren variieren. In Rohrreaktoren hängt die Effizienz der chemischen Reaktionen stark von der Einhaltung bestimmter Temperaturprofile entlang der Reaktionsrohre ab. Höhere Betriebstemperaturen bewirken dabei typischerweise eine effizientere Umwandlung, allerdings muss eine Überhitzung unbedingt vermieden werden, um den Katalysator in den Reaktionsrohren nicht zu beschädigen. Bei stark exothermen Reaktionen wie beispielsweise Partialoxidationen können die Temperaturen schnell auf über 700 °C steigen und besonders beim Anfahren des Prozesses zu Beschädigungen des Katalysators führen. Eine Überwa-



Abbildung 3: Temperaturmesssonde mit vier RFBG-Sensornetzwerken und insgesamt 24 Messstellen nach dem Einsatz im Abgasdiffusor einer Gasturbine. Der Sondenkörper besteht aus Inconel und wurde mittels eines additiven Verfahrens (3D-Druck) hergestellt (Foto: Hochschule für angewandte Wissenschaften München).

chung und Kontrolle der axialen Temperaturverteilung in den Reaktionsrohren ist deshalb von großer Bedeutung.

Bei konventionellen elektrischen Temperatursensoren ist eine Erhöhung der Messpunktdichte immer mit einem höheren Verkabelungsaufwand und damit auch Platzbedarf verbunden. Um die Messbedingungen nicht zu verfälschen, müssen bei den genannten Anwendungen die Sensoren aber so klein wie möglich sein, was bisher die Anzahl von möglichen Messpunkten stark limitierte.

Das Labor für Photonik der Hochschule für angewandte Wissenschaften München betreibt angewandte Forschung auf dem Gebiet der faseroptischen Sensorik auf Basis von Faser-Bragg-Gittern (FBG) für industrielle und medizinische Anwendungen. Die dabei verwendeten Glasfasern bestehen aus hochreinem Quarzglas, sind chemisch inert und können u. a. Temperaturen, Dehnungen und Kräfte erfassen. Das Labor für Photonik verfügt über ein spezielles Herstellungsverfahren für sog. „regenerierte Faser-Bragg-Gitter (RFBG)“, die Temperaturen bis über 1000 °C standhalten können. Weiter-

hin ist das Messsignal unempfindlich gegenüber elektromagnetischer Interferenz (EMI). Der größte Vorteil der RFBG-Sensortechnologie für die Anwendung in Gasturbinen und chemischen Reaktoren liegt darin, dass sie die Integration einer Vielzahl von Messstellen in eine einzige optische Faser erlaubt. Dabei wird Licht durch die Faser an die mit einem UV-Laser eingepprägten Messstellen geführt, und dort wird in Abhängigkeit der lokalen Temperatur jeweils ein Teil des einfallenden Spektrums reflektiert. Die Wellenlängenkodierung des Messsignals ermöglicht es, die einzelnen Messpunkte eines Sensornetzwerks voneinander zu unterscheiden, obwohl alle Sensoren dieselbe Messleitung teilen. Dadurch lässt sich der für die Sensorik notwendige Verkabelungsaufwand und Platzbedarf drastisch reduzieren.

Der für den Einsatz der RFBG-Sensortechnologie bei hohen Temperaturen notwendige Regenerationsvorgang war zu Beginn des Projekts noch weitgehend unbekannt. Anfangs stand deshalb die Untersuchung der physikalischen Mechanismen des Regenerationsprozesses im Vordergrund. Weiterhin wurde das Drift- und Korrosions-

verhalten der Sensorelemente untersucht und optimiert, um eine möglichst hohe Langzeitstabilität der Sensoren zu erzielen. Darüber hinaus wurde eine robuste Aufbautechnik für die Sensornetzwerke entwickelt, welche den Einsatzbedingungen großtechnischer Anlagen auch über Jahre standhalten kann. Schließlich war es das Ziel, die Einsatzfähigkeit der faseroptischen Sensoren in Gasturbinen und prozesstechnischen Anlagen zu demonstrieren.

Durch umfassende Untersuchungen zur Regeneration, Sensordrift und Korrosion von Glasfasern gelang es, optimale Parameter für den Herstellprozess von RFBG zu ermitteln. Weiterhin wurde eine Spezialfaser gefunden, welche sich besonders gut für den Einsatz bei hohen Temperaturen eignet. Diese Konfiguration wurde als Gebrauchsmuster angemeldet. Mithilfe der neu entwickelten Herstellverfahren und Aufbautechnik war es schließlich möglich, RFBG-Sensoren mit hoher Funktionalität und Langzeitstabilität zu produzieren. Durch die Anwendung eines speziellen Kalibrierverfahrens erreichen die Fasersensoren eine Genauigkeit von ± 2 K im gesamten Temperaturbereich von Raumtemperatur bis zu 800 °C. Es wurden verschiedene RFBG-Sensornetzwerke mit bis zu 24 Messstellen bei Durchmessern kleiner als 2 mm realisiert und in industriellen Anwendungen getestet.

Für Temperaturmessungen im Abgasdiffusor einer Gasturbine wurden die RFBG-Sensoren in speziell angepasste Messsonden aus Inconel integriert. Aufgrund der besonderen Geometrie kam dabei ein additives Fertigungsverfahren (3D-Druck) für die Messsonden zur Anwendung. Diese instrumentierten Messsonden wurden im Abgasstrahl einer 6 MW Gasturbine erfolgreich in einem Temperaturbereich bis 700 °C betrieben (Abbildung 3), und es wurde gezeigt, dass die radiale Temperaturverteilung mit hoher räumlicher Auflösung bei minimaler Strömungsbeeinflussung auch unter den extremen Umgebungsbedingungen einer Gasturbine erfasst werden kann (Abbildung 4). Parallel ablaufende Langzeituntersuchungen über zwei Jahre in einem chemischen Testreaktor haben erstmals nachgewiesen, dass mit der RFBG-Technologie über mehrere Meter ausgedehnte Temperaturprofile mit hoher Genauigkeit, schneller Ansprechzeit und geringer Sensordrift gemessen und über mehr als zwei Jahre bei Betriebstemperaturen im Bereich von 500 °C störungsfrei eingesetzt werden können.

Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführte Erforschung der RFBG-Sensortechnologie führte somit dazu, dass diese Technologie die extremen industriellen Anfor-

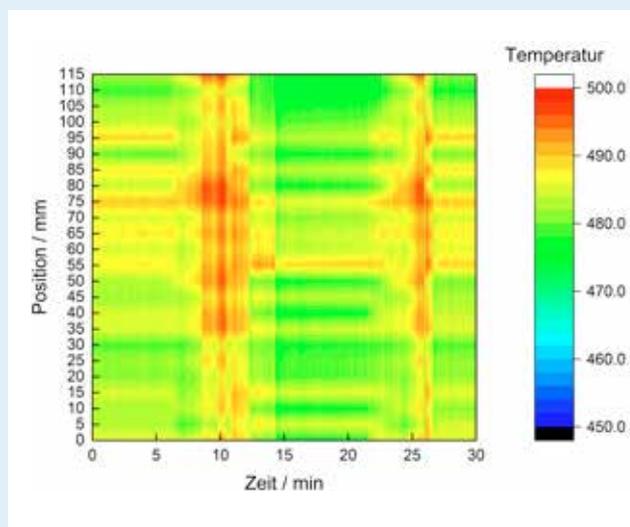


Abbildung 4: Radiales Temperaturprofil im Abgasstrahl einer Gasturbine. Die räumliche Auflösung beträgt 5 mm bei einer Messfrequenz von ca. 10 Hz.

derungen erfüllt, die Leistungseigenschaften konventioneller Einzelpunktsensoren einhält und darüber hinaus weitere Vorteile hinsichtlich der Multiplexfähigkeit, der Reduktion des Verkabelungsaufwands, der Miniaturisierung und der Unempfindlichkeit gegenüber Störbeeinflussungen durch EMI bietet. Diese Vorteile können für die zukünftige verbesserte Instrumentierung von z. B. chemischen Röhrenreaktoren und Gasturbinen genutzt werden, was zu optimierten Maschinen- und Anlagenkonstruktionen und Betriebskonzepten führen wird.

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts wurden im Rahmen von insgesamt sechs Artikeln in Fachzeitschriften und zwei Vorträgen auf wissenschaftlichen Konferenzen publiziert. Aufgrund des sehr erfolgreichen Projekts steht ein neues Sensorverfahren zur Verfügung, welches auch in anderen Industriebereichen die technologische Weiterentwicklung der Anlagen ermöglichen und Innovationsimpulse auslösen wird.

Bildnachweis

Titel, Seiten 5, 12, 13, 19, 20, 21, 68, 69, 75-96

HAAK & NAKAT [www.haak-nakat.de]

Seiten 6, 8, 10, 14, 16, 70-73, 97

Bayerische Forschungstiftung

Seite 70:

Hubert Aiwanger: © StMWi

Erfolgsstories

Seiten 23-25

Hochschule Landshut

Seiten 27-28

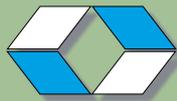
Technische Universität München,
Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM)

Seiten 31

MAN Energy Solutions SE, Turbomachinery
Oberhausen,
MAN Energy Solutions SE, DWE-Reactors
Deggendorf

Seiten 32-33

MAN Energy Solutions SE. DWE-Reactors
Deggendorf



Bayerische Forschungsstiftung

Prinzregentenstraße 52
80538 München
Telefon +49 89 /21 02 86-3
Telefax +49 89 /21 02 86-55

forschungsstiftung@bfs.bayern.de
www.forschungsstiftung.de
www.forschung-innovation-bayern.bayern.de

Büro Nürnberg
Am Tullnaupark 8
90402 Nürnberg
Telefon +49 911 /507 15-800
Telefax +49 911 /507 15-888



Bayerische
Forschungs- und
Innovationsagentur

