

# **Maßgeschneiderte Gleitlagerbeschichtungen für hochbelastete Lagerstellen durch Thermisches Spritzen**

Wolfgang Maximilian Wietheger

---

Oktober 2021

**Schriftenreihe Oberflächentechnik, Band 69**

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. K. Bobzin

Partner im  
LABORATORIUM  
FÜGETECHNIK  
OBERFLÄCHENTECHNIK



# **Maßgeschneiderte Gleitlagerbeschichtungen für hochbelastete Lagerstellen durch Thermisches Spritzen**

## **Tailored Coatings for Highly Stressed Sliding Bearings by Thermal Spraying**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen  
Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieur-  
wissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Wolfgang Maximilian Wietheger

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs

Tag der mündlichen Prüfung: 08.09.2021



Schriftenreihe Oberflächentechnik

Band 69

**Wolfgang Maximilian Wietheger**

**Maßgeschneiderte Gleitlagerbeschichtungen für  
hochbelastete Lagerstellen durch Thermisches Spritzen**

Shaker Verlag  
Düren 2021

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2021)

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8262-3

ISSN 1864-0796

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Oberingenieur am Institut für Oberflächentechnik (IOT) der RWTH Aachen. Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse stammen aus dem durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt „Thermisch gespritzte Gleitlagerbeschichtungen für Hauptlager von Windenergieanlagen (WEA) - WEA-GLiTS“ (03EK3036A).

An erster Stelle gilt mein Dank Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin, die diese Arbeit ermöglicht hat. Insbesondere ihr entgegengebrachtes Vertrauen, die spannende Aufgabenstellung und die fachliche sowie menschliche Betreuung haben maßgeblich zum Gelingen beigetragen. Ebenso danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs für die Übernahme des Koreferats und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Den Herren Dr. rer. nat. Alexander Barth, Dr.-Ing. František Zahálka, Edgar Gust, Dr.techn. Johannes S. Hölzl, Dr.-Ing. Tim Schröder sowie Amadeus Rolink gilt mein besonderer Dank für den fachlichen Austausch und die freundliche Unterstützung als Projektpartner. Zusätzlich sei an dieser Stelle dem BMBF für die finanzielle Unterstützung und dem Projektträger Jülich für die Betreuung des Forschungsprojektes gedankt.

Ganz herzlich bedanke ich mich bei den Mitarbeitenden am IOT, die stets als Team für ausreichende Motivation gesorgt und mich sowohl fachlich, administrativ als auch technisch unterstützt haben. Besonderer Dank gilt dabei meinen aktiven als auch ehemaligen Kolleginnen und Kollegen Dr.-Ing. Mehmet Öte, Dr.-Ing. Tobias Brögelmann, Hendrik Heinemann, Dr.-Ing. Christian Kalscheuer, Dr.-Ing. Thomas Frederik Linke, Dr.-Ing. Tim Königstein, Elisa Burbaum, Lukas M. Johann und Dr.-Ing. Lidong Zhao.

Abschließend sei meinen Freunden und meiner Familie gedankt. Insbesondere danke ich den Herren Dr.-Ing. Martin A. Knoch und Dr.-Ing. Jan Sommer für das Korrekturlesen sowie die gemeinsamen Unterfangen, Herrn Nils Jagodzinski für die zahllosen Zerstreuungen und meinen Eltern für die liebevolle und stetige Forderung nach Neugier.

Aus tiefstem Herzen danke ich meiner Frau Alexa für die brennende Unterstützung und für die größte Entdeckung während der Erstellungsphase dieser Arbeit, unsere Tochter Matilda.

---

**Zusammenfassung**

Das Rotorhauptlager von Windenergieanlagen (WEA) stellt eine besonders hochbelaste Lagerstelle dar. Die derzeit überwiegend eingesetzten Wälzlager stoßen jedoch vermehrt an ihre technischen Grenzen und haben somit eine direkte Auswirkung auf die Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien. Eine vielversprechende Alternative stellt die Verwendung von Gleitlagern für diese Anwendung dar, deren mögliche Segmentierung im Schadensfall einen einfacheren Austausch im Gegensatz zu aktuell verwendeten Wälzlagern verspricht. Der Einsatz von konventionellen Gleitlagern wird meist jedoch auf den Bereich der Hydrodynamik beschränkt. Für das vorherrschende Belastungskollektiv aus hohen dynamischen Lasten und häufigen Anfahrvorgängen muss speziell eine hohe Verschleißbeständigkeit auch im Mischreibungsgebiet gewährleistet werden. Eine Möglichkeit zur Herstellung anforderungsgerechter Gleitlagerbeschichtungen bietet das Thermische Spritzen (TS). Hierdurch sind Werkstoffkombinationen realisierbar, die durch die bisher eingesetzten Verfahren wie Walzplattieren oder Schleuderguss nicht herstellbar sind oder Beschränkungen hinsichtlich Form und Größe unterliegen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Spritzzusatzwerkstoffe ausgewählt und mittels des Atmosphärischen Plasmaspritzens (APS), einer TS-Verfahrensvariante, appliziert. Zur Bewertung und Auswahl der Schichtsysteme wurden tribologische Hochlastuntersuchungen in einem geschmierten Ring-Scheibe-Tribometer durchgeführt. Insgesamt konnte in den tribologischen Untersuchungen insbesondere eine thermisch gespritzte Beschichtung auf einer Kobaltbasis aus CoCrAlYSi mit hexagonalem Bornitrid den geringsten Materialabtrag und somit eine hohe Verschleißbeständigkeit aufweisen. Dieses Verhalten konnte zusätzlich mittels unterschiedlicher Gleitlagerprüfstände bestätigt und das Schichtsystem zur finalen Evaluierung für ein Demonstratorlager ausgewählt werden. Hierbei wurde erstmalig eine thermisch gespritzte Gleitlagerbeschichtung als Substitution konventionell eingesetzter Wälzlager unter realistischen Betriebsbedingungen für Hauptlagerungen von WEA qualifiziert. Die Überprüfung erfolgte mithilfe eines Systemprüfstands am Center for Wind Power Drives (CWD) der RWTH Aachen. Nach einer Testanzahl von über  $n > 8.000$  Anfahrzyklen, entsprechend einer Betriebsdauer von circa acht Jahren, war kein ausgeprägter Materialabtrag feststellbar. Hierdurch konnte das Potential der thermisch gespritzten Gleitlagerbeschichtung für die Rotorhauptlager von WEA bestätigt werden.



### **Abstract**

The main bearings of wind turbine generators (WTG) represent a particularly highly stressed bearing position. Currently, mainly rolling bearings are used in these turbines, but they are reaching their technical limits and thus have an impact on the electricity production costs of renewable energies. A promising alternative is the use of sliding bearings for this application, whose possible segmentation promises simple replacement in the event of damage, in contrast to the rolling bearings currently used. However, the use of conventional sliding bearings is usually limited to the field of hydrodynamics. For the prevailing load spectrum consisting of high dynamic loads and frequent start-up processes, high wear resistance must be ensured, in particular in the mixed friction area. One possibility for the production of customized sliding bearing coatings is the use of thermal spraying (TS). In this way, material combinations can be realized which cannot be produced by the processes used to date, such as roll cladding or centrifugal casting, or which are subject to restrictions in terms of shape and size.

In this work, different feedstock materials were selected and applied by means of atmospheric plasma spraying (APS), a TS process variant. For the evaluation and selection of the coating systems, tribological high-load tests were carried out in a lubricated ring-disk tribometer. Overall, in the tribological investigations, a thermally sprayed cobalt-based coating of CoCrAlYSi with hexagonal boron nitride in particular was able to provide the lowest material removal. This behavior was additionally confirmed by means of different sliding bearing test rigs and the coating system was selected for final evaluation for a demonstrator bearing. For the first time, a thermally sprayed sliding bearing coating was qualified as a substitute for conventionally used rolling bearings under realistic operating conditions for the main bearings of WTGs. The test was carried out using a system test rig at the Center for Wind Power Drives (CWD) at RWTH Aachen University. After more than  $n > 8,000$  start-up cycles, corresponding to an operating time of about 8 years, no pronounced material removal was detectable. In this way, the potential of thermally sprayed sliding bearing coatings for the rotor main bearing of a WTG could be confirmed.

---

**Inhaltsverzeichnis**

|          |                                                                        |            |
|----------|------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                                      | <b>1</b>   |
| <b>2</b> | <b>Stand der Technik und Forschung</b>                                 | <b>3</b>   |
| 2.1      | Grundlagen hochbelasteter Lagerungen                                   | 3          |
| 2.1.1    | Tribologische Beanspruchung in Lagerstellen                            | 5          |
| 2.1.2    | Funktion und konventionelle Auslegung von Gleitlagerungen              | 10         |
| 2.1.3    | Etablierte Werkstoffsysteme für den Einsatz in Gleitlagern             | 13         |
| 2.1.4    | Hauptlager von Windenergieanlagen                                      | 21         |
| 2.2      | Grundlagen des Thermischen Spritzens                                   | 27         |
| 2.2.1    | Atmosphärisches Plasmaspritzen                                         | 32         |
| 2.2.2    | Thermisch gespritzter Beschichtungen in gleitbeanspruchten Anwendungen | 34         |
| <b>3</b> | <b>Motivation und Zielsetzung</b>                                      | <b>39</b>  |
| <b>4</b> | <b>Entwicklung thermisch gespritzter Gleitlagerbeschichtungen</b>      | <b>43</b>  |
| 4.1      | Werkstoffauswahl und Pulvercharakterisierung                           | 43         |
| 4.2      | Herstellung thermisch gespritzter Beschichtungen                       | 53         |
| 4.3      | Hochlastuntersuchungen mittels Ring-Scheibe-Tribometer                 | 59         |
| <b>5</b> | <b>Integration von Festschmierstoffen beim Thermischen Spritzen</b>    | <b>85</b>  |
| 5.1      | Beeinflussung des Festschmierstoffgehalts                              | 85         |
| 5.2      | Hochlastuntersuchungen angepasster Schichtsysteme                      | 92         |
| <b>6</b> | <b>Modellversuche an Gleitlagerprüfständen</b>                         | <b>101</b> |
| 6.1      | Prüfstandsuntersuchung bei ausgeprägter Mischreibung                   | 101        |
| 6.2      | Start-Stopp-Tests an Gleitlagerprüfstand                               | 110        |
| <b>7</b> | <b>Validierung mittels WEA-Systemprüfstand</b>                         | <b>117</b> |
| 7.1      | Oberflächencharakterisierung nach Testende                             | 120        |
| 7.2      | Schmierstoffanalyse nach Testende                                      | 124        |
| <b>8</b> | <b>Zusammenfassung</b>                                                 | <b>131</b> |
| <b>9</b> | <b>Ausblick</b>                                                        | <b>135</b> |

|           |                                  |            |
|-----------|----------------------------------|------------|
| <b>10</b> | <b>Literaturverzeichnis</b>      | <b>137</b> |
| <b>11</b> | <b>Abbildungsverzeichnis</b>     | <b>A</b>   |
| <b>12</b> | <b>Tabellenverzeichnis</b>       | <b>G</b>   |
| <b>13</b> | <b>Abkürzungen</b>               | <b>H</b>   |
| <b>14</b> | <b>Formelzeichen / Einheiten</b> | <b>I</b>   |