

# Schnelle multiphysikalische Simulation aktiver und adaptiver Dichtungen aus Polytetrafluorethylen unter Verwendung einer Gitterrostmethode

vorgelegt von  
M. Sc.  
Florian Albrecht  
geb. in Hamburg

von der Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften  
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

**TWI 2**

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Utz von Wagner

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang H. Müller

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Albrecht Bertram

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Thomas Kletschkowski

Tag der wissenschaft



**TW095622**

Januar 2019

Berlin 2019

# Kurzfassung

Wellendichtungen sollen das Austreten von Öl und das Eindringen von Schmutzpartikeln an Wellenausgängen verhindern. In anspruchsvollen Fällen werden Dichtungen aus Polytetrafluorethylen eingesetzt, da diese eine gute thermische und chemische Beständigkeit haben. Die Dichtfunktion muss in allen Betriebspunkten und auch im Stillstand der Maschine gewährleistet sein. Dabei sollen die Reibungsverluste, der Verschleiß sowie die reibungsinduzierte Temperaturentwicklung so gering wie möglich sein.

Zur Auslegung einer aktiven oder adaptiven Dichtung wird ein numerisch effizientes und multiphysikalisches Simulationsmodell des Dichtsystems entwickelt. Dies basiert auf der von Hrennikoff entwickelten Gitterrostmethode und verwendet ein rheologisches Materialmodell. Weitergehend ist es thermo-mechanisch gekoppelt und berücksichtigt Verschleiß.

Mit diesem wird zunächst ein Mechanismus zur Erwärmung der Dichtung und somit zur aktiven Beeinflussung der Materialeigenschaften untersucht. Die multiphysikalischen Simulationen zeigen, dass die Heizleistung für eine optimale Energieeinsparung stark drehzahlabhängig ist. Als weitere aktive/adaptive Methode wird die Verwendung von Drähten aus Formgedächtnislegierungen näher betrachtet. Mit dieser kann die Radialkraft der Dichtung erhöht beziehungsweise verringert werden. Der Formgedächtniseffekt wird durch eine Temperaturerhöhung bei etwa 80 °C aktiviert. Dies erlaubt die Verwendung dieser Methode für adaptive Dichtungen, bei der die Temperaturänderung von der Umgebung hervorgerufen wird oder über die Erwärmung des Formgedächtnisdrahtes mit einem elektrischen Strom als aktive Dichtung. Mit beiden Methoden lassen sich bei gleicher statischer Dichttheit die Reibungsverluste, der Verschleiß und die Temperaturerhöhung im Dichtkontakt verringern.

# Abstract

Shaft seals shall prevent the leakage of oil and the intrusion of dirt particles at rotating shafts. In demanding cases, seals made of polytetrafluoroethylene are used, due to its high thermal and chemical resistance. The sealing function must be ensured under all operating conditions, including standstill. The frictional losses, wear and friction-induced temperature development should be as low as possible.

Here, in order to design an active or adaptive seal, a numerically efficient and multiphysical simulation model of the sealing system is developed. The simulation model is based on the Hrennikoff framework method and a rheologic material model. It is thermomechanically coupled and respects wear.

First, a mechanism for heating the seal and thus actively influencing the material properties is investigated. The multiphysical simulations show that the heating power for optimum energy savings is highly dependent on shaft speed. As a second active/adaptive method, the use of wires made of shape-memory alloys is investigated for their ability to change the radial force of the seal. The shape-memory effect is activated by a temperature increase at about 80 °C. This allows the use of this method for adaptive seals, where the temperature change is caused by the environment or by heating the shape-memory wire with an electric current as an active seal. With both methods frictional losses, frictional-induced heating, and wear can all be reduced while retaining the same static tightness.

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Hamburg. Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Thomas Kletschkowski, nicht nur für den Themenvorschlag, der Ermöglichung und Betreuung meiner Arbeit, sondern auch für die stetige Unterstützung, den fachlichen sowie außerfachlichen Diskussionen, das offene Arbeitsklima und der Begutachtung meiner Dissertation.

Bei Prof. Dr.-Ing. Albrecht Bertram bedanke ich mich für das Interesse an meiner Arbeit, die wissenschaftliche Begleitung und für die Übernahme des Gutachtens. Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang H. Müller danke ich für die Begutachtung meiner Dissertation und Prof. Dr.-Ing. Utz von Wagner danke ich für die Leitung des Promotionsausschusses.

Meinen ehemaligen Arbeitskollegen und Mitdoktoranden von der HAW Hamburg danke ich für die stets angenehme Zeit. Besonders gut werden mir die Abende meiner Reisen zu Konferenzen und Lehrgängen mit Daniel Sadra, Dr.-Ing. Felix Langfeldt und Hannah Hoppen sowie meinem Bürokollegen Maximilian Schutzeichel in Erinnerung bleiben.

Weitergehend bedanke ich mich bei folgenden Personen für die Zusammenarbeit, fachlichen Austausch, Anregungen und technischen sowie organisatorischen Unterstützungen: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Fervers, Prof. Dr.-Ing. Frank Ihlenburg, Prof. Dr.-Ing. Eberhard Bock, Suhaib Koji Baydoun, Lukas Lamm, Herbert Theilen und Birte Albrecht.

Meinen Eltern Karen Schueler-Albrecht und Dr.-Ing. Thomas Albrecht möchte ich dafür danken, dass sie meine technische Neugier stets gefördert und mir das Studium ermöglicht haben.

Zuletzt gilt mein außerordentlicher Dank meiner Freundin Anna Stegmann, die durch ihre moralische Unterstützung einen besonderen Teil zu dieser Arbeit beigetragen hat.

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Einleitung</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2. Stand der Technik</b>  | <b>5</b>  |
| 2.1. Grundlagen des drucklosen Abdichtens von rotierenden Maschinen . . . .                            | 5         |
| 2.1.1. Beschreibung des Verhaltens von PTFE . . . . .  | 8         |
| 2.1.2. Überblick der Forschung im Bereich der PTFE-Wellendichtungen .                                  | 10        |
| 2.1.3. Ansätze für aktive oder adaptive Wellendichtungen . . . . .                                     | 14        |
| 2.1.4. Abgrenzung zum Stand der Technik . . . . .  | 15        |
| 2.2. Einordnung in die Technische Mechanik . . . . .   | 16        |
| 2.2.1. Materialmodelle für Polytetrafluorethylen . . . . .   | 17        |
| 2.2.2. Diskrete Verfahren der Modellbildung . . . . .  | 18        |
| <b>3. Anwendung der Gitterrostmethode auf nichtlineare Probleme</b>                                    | <b>23</b> |
| 3.1. Uniaxialer Zug und einfache Scherung . . . . .  | 23        |
| 3.2. Kombiniertes Belastungsfall . . . . .   | 26        |
| <b>4. Multiphysikalische Simulation von Wellendichtungen</b>   | <b>29</b> |
| 4.1. Aufziehen der Dichtung auf eine Welle . . . . .   | 31        |
| 4.1.1. Modellbildung und Diskretisierung der Dichtung . . . . .  | 31        |
| 4.1.2. Materialgesetz für PTFE . . . . .   | 37        |
| 4.1.3. Diskussion des Verlaufs der Radialkraft beim Aufziehen der Dichtung<br>auf eine Welle . . . . . | 39        |
| 4.2. Kopplung der Dichtung mit einer exzentrischen Welle . . . . .                                     | 46        |
| 4.2.1. Beschreibung des Laval-Rotors . . . . .   | 46        |
| 4.2.2. Quasiaxialsymmetrische Beschreibung der Dichtung . . . . .                                      | 48        |
| 4.2.3. Erweiterung des Materialgesetzes für dynamische Simulationen . .                                | 49        |
| 4.2.4. Diskussion der Dichtlippenfolgefähigkeit . . . . .  | 52        |
| 4.3. Numerische Analyse der Wärmeleitung im Dichtsystem . . . . .                                      | 56        |
| 4.3.1. Reibungsmodell für Polytetrafluorethylen . . . . .  | 59        |
| 4.3.2. Berücksichtigung der Wärmeausdehnung . . . . .  | 61        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 4.3.3.    | Diskussion der Wärmeleitung in Dichtung und Welle . . . . .             | 61        |
| 4.4.      | Numerische Untersuchungen zum Verschleiß . . . . .                      | 64        |
| 4.4.1.    | Darstellung der Verschleißsimulation . . . . .                          | 65        |
| 4.4.2.    | Bestimmung des Verschleißkoeffizienten . . . . .                        | 68        |
| <b>5.</b> | <b>Konzeptionelle Analyse aktiver und adaptiver Wellendichtungen</b>    | <b>73</b> |
| 5.1.      | Aktive Erwärmung der Dichtung zur Reduzierung der Radialkraft . . . . . | 73        |
| 5.2.      | Formgedächtnislegierungen zur Radialkrafteinstellung . . . . .          | 76        |
| 5.3.      | Diskussion beider aktiven/adaptiven Methoden . . . . .                  | 84        |
| <b>6.</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                                     | <b>87</b> |
| <b>A.</b> | <b>Anhang</b>   | <b>91</b> |
| A.1.      | Herleitung der Steifigkeitsmatrix . . . . .                             | 91        |
| A.2.      | Materialparameter für PTFE . . . . .                                    | 92        |
| A.3.      | Formulierung der Wärmeleitung . . . . .                                 | 92        |
| A.4.      | Variation des Konvektionsparameters . . . . .                           | 93        |
| A.5.      | Entwicklungsgleichungen und Materialparameter für SMA . . . . .         | 94        |