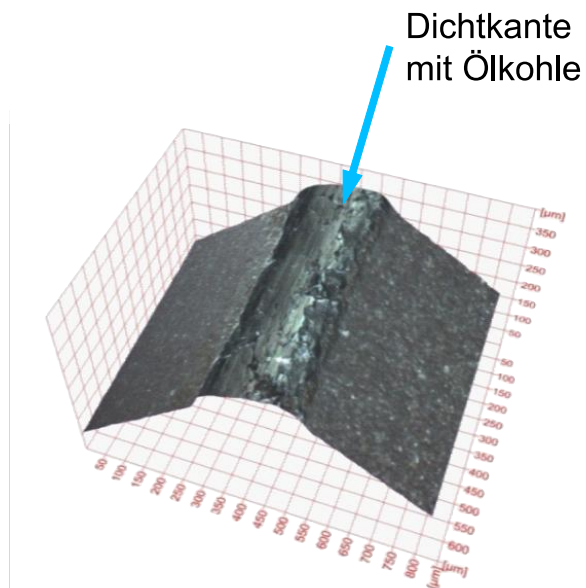


Dieses TechSheet gibt Hinweise zur Auslegung, Dimensionierung und Konzeption eines sensorintegrierenden Maschinenelements. Der besondere Fokus liegt dabei auf einem System zur Überwachung der Kontakttemperatur eines tribologischen Kontakts. Dieser tribologische Kontakt darf nicht durch das Messsystem verändert oder gestört werden. Die Design-Guideline wurde im Projekt SmartSeal anhand eines Systems zur Überwachung eines Dichtkontakts bei Radial-Wellendichtungen entwickelt. Das grundlegende Vorgehen lässt sich aber auch auf andere Tribosysteme anwenden.

## Kontakttemperatur bei Radial-Wellendichtungen

Beim Tribosystem Radial-Wellendichtung berührt die Dichtkante des Radial-Wellendichtrings die Welle. Wenn die Welle im Betrieb rotiert, entsteht in diesem Kontaktbereich Reibwärme. Durch die begrenzte Wärmeabfuhr an die Umgebung steigt die Temperatur im Kontaktbereich. Diese Temperatur wird Kontakttemperatur genannt. Sie dient dazu, das Risiko einer thermischen Schädigung zu beurteilen.

Hohe Kontakttemperaturen können zur Verhärtung des Elastomers der Dichtkante und / oder zur Bildung von Ölkohle führen, Bild rechts. Beide Effekte können den dynamischen Dichtmechanismus stören und schließlich zum Ausfall des Dichtsystems führen. Der Ausfall verursacht häufig große ökologische und ökonomische Schäden. Hohe Kontakttemperaturen sind deshalb zu vermeiden. Möglichkeiten zur Reduktion der Kontakttemperatur bei Radial-Wellendichtungen sind im gleichnamigen IMA-TechSheet #104180 beschrieben [1].



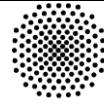
## Wärmeentstehung, Wärmeabfuhr und Temperaturverteilung

Die Reibungswärme entsteht während der Rotation durch die Scherung des dünnen Fluidfilms im Kontaktbereich zwischen der Wellenoberfläche und der Dichtkante. Wie im nachfolgenden Bild zu sehen wird sie durch Wärmeleitung, Konvektion (und Strahlung) an die Umgebung abgegeben.

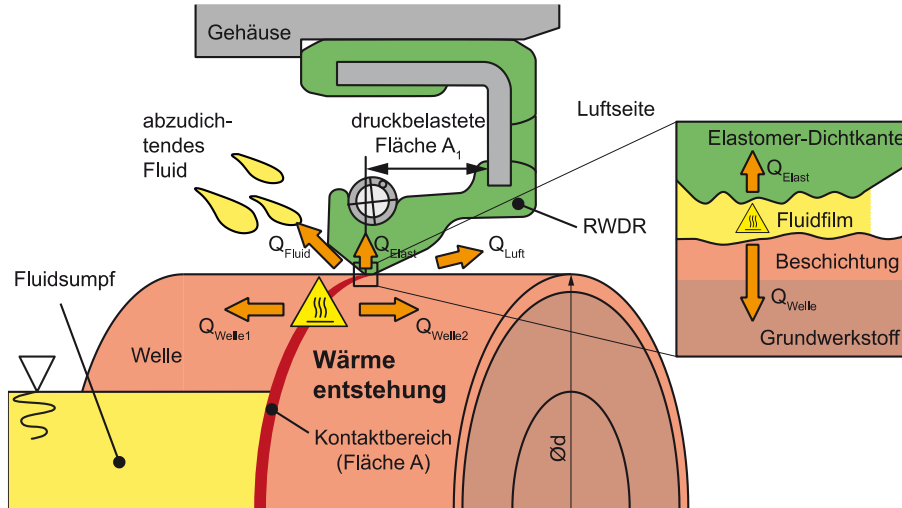
# Design-Guideline Temperatur-Sensor

## Auslegung, Dimensionierung und Konzeption eines sensorintegrierenden Maschinenelements zur Temperaturüberwachung eines Tribokontakts

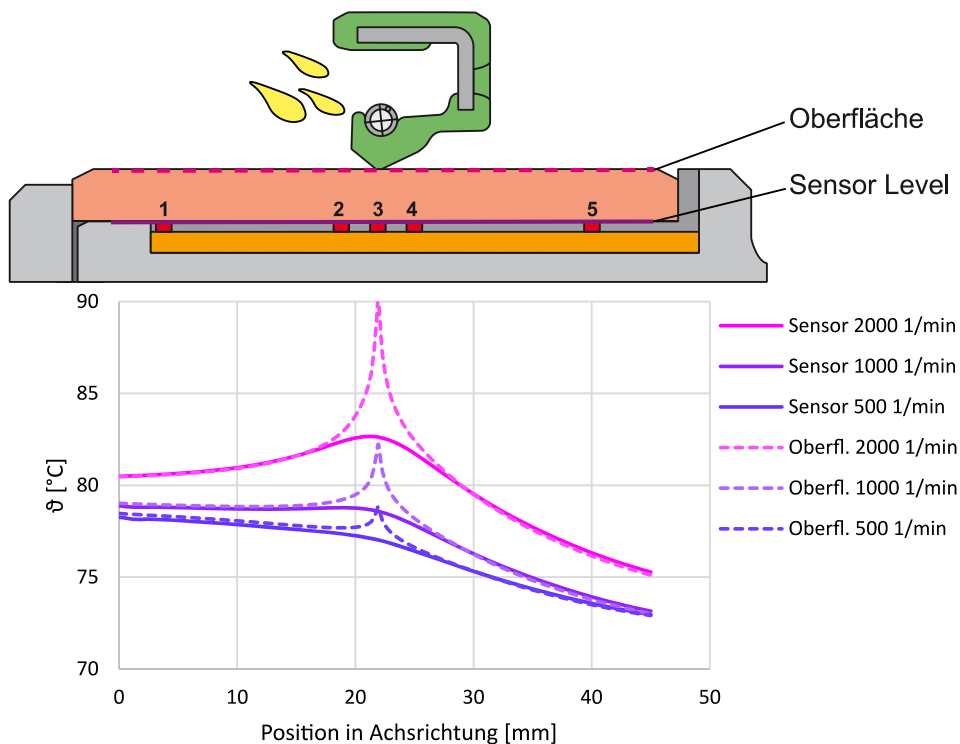
IMA-TechSheet #104185v1

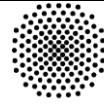


Universität Stuttgart  
Institut für Maschinenelemente



Die Welle erwärmt sich im Kontaktbereich stark. Mit zunehmendem Abstand zum Kontaktbereich sinkt die Temperatur. Die direkte Messung im Kontaktbereich ist nicht möglich, da durch die Anbringung eines Sensors im Kontakt dieser Tribokontakt gestört wird. Die simulierte Temperaturverteilung an der Oberfläche einer Welle und in gewisser Tiefe (Sensor Level) sind im nachfolgenden Diagramm für unterschiedliche Betriebspunkte ersichtlich.

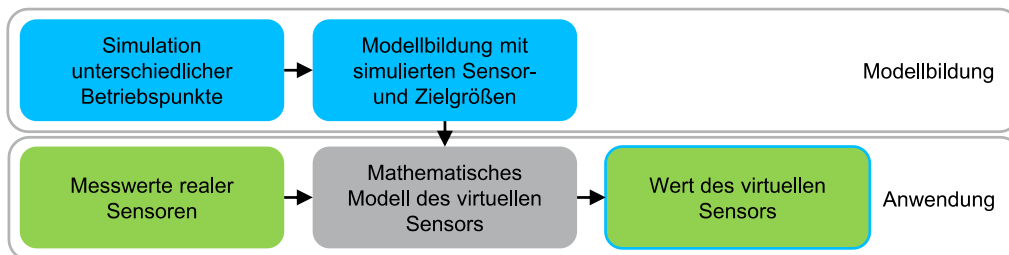




Im Falle des SmartSeal-Systems wird die Temperatur wie im vorherigen Bild ersichtlich, an 5 Positionen in derselben Tiefe unter der Wellenoberfläche gemessen. Anhand dieser Messungen soll die Kontakttemperatur durch einen virtuellen Sensor ermittelt werden.

## Virtueller Sensor

Ein virtueller Sensor errechnet seine Messgröße anhand eines mathematischen Modells und den Daten anderer Sensoren. Mit Hilfe dessen ist es möglich, Zustandsgrößen von Stellen zu bestimmen, an denen, wie im Kontaktbereich der Dichtung, kein physischer Sensor platziert werden kann. Um einen virtuellen Sensor nutzen zu können, muss zunächst das mathematische Modell erstellt werden. Dies kann durch die Simulation des gesamten Systems erfolgen, wodurch die Sensor- und Zielgrößen für bestimmte Betriebspunkte ermittelt werden. Anschließend kann das mathematische Modell anhand der bereitgestellten Sensordaten die Zielgröße vorhersagen. Dieses grundlegende Vorgehen ist in der nachfolgenden Grafik beschrieben.



Für die Temperaturüberwachung im Tribokontakt werden die Sensoren innerhalb der Welle, etwas unterhalb der Oberfläche, platziert, um die Temperaturverteilung zu charakterisieren und das mathematische Modell des virtuellen Sensors zu speisen.

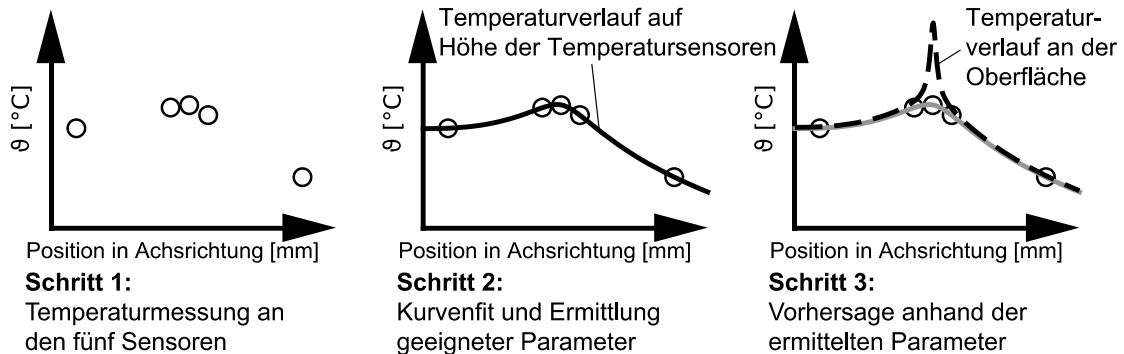
## Simulation

Um die Temperaturverteilung innerhalb des Kontaktbereichs für einen bestimmten Betriebszustand zu ermitteln kann eine gekoppelte Wärme- und Strömungssimulation durchgeführt werden, die das zu untersuchende Tribosystem samt Umgebung abbildet[2, 3]. Zur Berücksichtigung des Wärmeaustauschs zwischen den festen und flüssigen Gebieten im Modell wird die Methode der gekoppelten Wärmeübertragung (CHT) empfohlen. Diese ermöglicht die Berechnung der Temperaturverteilungen sowohl in den Festkörper- als auch in Fluidgebieten. Für die Darstellung der Wechselwirkung zwischen Flüssigkeiten und Luft sollte ein Mehrphasenströmungsansatz gewählt werden.

Anhand der Simulationen wird die Temperatur an der Stelle des virtuellen Sensors im Kontaktbereich, als auch an den Positionen der physischen Sensoren ausgewertet.

## Mathematisches Modell

Ein mathematisches Modell kann anhand der Simulationsdaten oder realen Messungen entwickelt werden. Für das SmartSeal-System wird das nachfolgende Vorgehen verwendet.

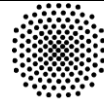


Bei einer Radial-Wellendichtung kann für die Modellierung der Temperatur in der Sensorebene der folgende Ansatz verwendet werden. Der Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Position in Achsrichtung  $\vartheta(x)$  kann durch die Kombination aus einer Glockenkurve und einer linearen Funktion beschrieben werden. Der Nullpunkt der  $x$ -Achse befindet sich auf der Ölseite. Die Temperatur auf der Sensorebene lässt sich für einen diskreten Zeitpunkt wie folgt berechnen:

$$\vartheta_{\text{Sensorebene}}(x, t) = a_1(t) \cdot e^{-\left(\frac{x-x_1(t)}{b_1+|x-x_1(t)|}\right)^2} - a_2(t) \cdot (x - x_1(t)) + a_3(t) \quad \text{in } ^\circ\text{C}$$

Der Parameter  $x_1(t)$  markiert den Bereich des Maximums der Glockenkurve. Der Parameter  $a_1(t)$  ist die Überhöhung der Glockenkurve an der Stelle  $x_1(t)$ . Der Parameter  $a_2(t)$  ist die Steigung der Geraden durch die Randpunkte. Der Parameter  $a_3(t)$  ist das Niveau der Geraden an der Stelle  $x_1(t)$ . Die Konstante  $b_1$  definiert die Form der Glockenkurve. Je kleiner  $b_1$  gewählt wird, desto spitzer wird die Glockenkurve. Die Parameter  $a_1(t)$ ,  $a_2(t)$  und  $a_3(t)$  müssen für jeden Messzyklus neu bestimmt werden. Die Konstante  $b_1$  wird nur einmalig anhand der Simulationen bestimmt. Die Ermittlung der Parameter erfolgt über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate und die bekannten Temperaturwerte an den Positionen der Sensoren  $\vartheta(x_{\text{Sensor1}}), \dots, \vartheta(x_{\text{Sensor5}})$ .

Aus der Gleichung ist ersichtlich, dass für diesen Schritt mindestens vier Sensoren für die Bestimmung von  $x_1(t)$ ,  $a_1(t)$ ,  $a_2(t)$  und  $a_3(t)$  notwendig sind. Die Verwendung von mehr Sensoren erhöht die Robustheit des Systems gegenüber der Streuung in der gemessenen Temperatur. Durch die Verwendung von robusten Regressionsmethoden anstatt der Methode der kleinsten Quadrate kann der Einfluss von einzelnen Ausreißern auf die zu bestimmenden Parameter weiter verbessert werden. Ein einfaches Beispiel ist die gewichtete Regression.



Für die Bestimmung der Temperatur an der Oberfläche  $\vartheta_{\text{Oberfläche}}(x, t)$  zum Zeitpunkt  $t$  wird die bestehende Gleichung für die Sensorebene um eine weitere Gauß-Funktion ergänzt. Diese modelliert die Temperaturüberhöhung in der Nähe des Dichtkontakts:

$$\vartheta_{\text{Oberfläche}}(x, t) = \vartheta_{\text{Sensorebene}}(x, t) + b_2 \cdot a_1(t) \cdot e^{-\left(\frac{x-x_2}{b_3+|x-x_2|}\right)^2 \cdot b_4}$$

Die Konstante  $b_2$  ist das Verhältnis aus der zusätzlichen Überhöhung im Kontaktbereich gegenüber dem Sensorniveau und dem Parameter  $a_1(t)$ . Die Konstante  $b_3$  definiert die Form der zweiten Glockenkurve und die Konstante  $b_4$  skaliert die zweite Glockenkurve in  $x$ -Richtung. Die Konstanten  $b_2$ ,  $b_3$  und  $b_4$  werden einmalig anhand der Simulationsergebnisse angepasst. Der Parameter  $x_2$  entspricht der Achsposition der Dichtkante.

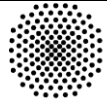
Die für den Smart-Seal-Prototyp verwendeten Parameter können dem Abschlussbericht [4] entnommen werden.

## Schaltung zur Temperaturbestimmung

Für die Auslegung der elektrischen Schaltung für die Temperaturmessung werden die Leitflächen (<https://www.analog.com/media/en/reference-design-documentation/reference-designs/cn0383.pdf>) und (<https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/how-to-select-and-design-the-best-rtd-temperature-sensing-system.html>) empfohlen. Das Forschungsprojekt hat gezeigt, dass eine vereinfachte Schaltung für die Widerstandsbestimmung von PT1000 Sensoren basierend auf (<https://www.analog.com/en/resources/reference-designs/circuits-from-the-lab/cn0391.html>) ausreicht.

**Design-Guideline Temperatur-Sensor**  
**Auslegung, Dimensionierung und Konzeption eines**  
**sensorintegrierenden Maschinenelements zur**  
**Temperaturüberwachung eines Tribokontakts**

IMA-TechSheet #104185v1



**Universität Stuttgart**  
 Institut für Maschinenelemente



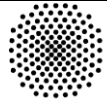
Friedrich-Alexander-Universität  
 Technische Fakultät

| Empfehlung   | Begründung  | Umsetzung im Prototyp „SmartSeal“  |
|--|---|--|
| <b>Sensorauswahl</b>   |   |  |
| Temperaturmessbereich 0 bis 200 °C                                     | Übliche Temperaturen im Dichtkontakt  | Pt1000 Sensor: P1K0.0603.4ST.B Sensoren von Innovative Sensortechnologie         |
| Kompakter Sensor, welcher eine geringe Breite in Achsrichtung aufweist | Bessere Auflösung in Achsrichtung für genauere Vorhersage   | Sensor quer zur Achsrichtung orientieren. (Lange Seite quer zur Umfangsrichtung) |
| <b>Sensoranordnung</b>   |   |  |
| Radial möglichst nahe an Oberfläche ohne Oberfläche zu verändern       | Gemessene Temperatur möglichst nahe an der Kontakttemperatur  | 2 mm unter Oberfläche  |
| Mehrere axial versetzte Sensoren in einheitlicher Tiefe                | Je mehr Temperaturwerte in Achsrichtung bekannt sind, desto genauer ist der Fit. Befinden sich die Sensoren alle in gleicher Tiefe, ist das Fitting deutlich einfacher als bei variabler Tiefe. | 5 Sensoren   |
| Positionierung eines Sensors direkt unter dem Tribokontakt             | Hier ist die höchste Temperatur messbar.  | Ein Sensor mittig unter Tribokontakt   |
| Weitere Sensoren in unmittelbarer Nähe zum Tribokontakt                | Mit den mittleren drei Sensoren lässt sich die Temperaturüberhöhung des Tribokontakts ermitteln.  | 2 weitere Sensoren in 3 mm Entfernung zum mittigen Sensor (links und rechts)     |
| In beide Achsrichtungen möglichst weit entfernt noch je 1 Sensor       | Bestimmung der Grundtemperatur der Welle auf beiden Seiten  | 2 weitere Sensoren in 18,5 mm Entfernung zum mittigen Sensor (links und rechts)  |
| Gute thermische Anbindung in Richtung Tribokontakt                     | Gleiche Temperatur in Sensor wie in umgebendem Material   | Thermischer Leitkleber (EC360G001 von Jaden Technologies GmbH)                   |

# Design-Guideline Temperatur-Sensor

## Auslegung, Dimensionierung und Konzeption eines sensorintegrierenden Maschinenelements zur Temperaturüberwachung eines Tribokontakts

IMA-TechSheet #104185v1



Universität Stuttgart

Institut für Maschinenelemente



Friedrich-Alexander-Universität  
Technische Fakultät

Seite 7

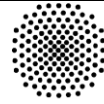
| Empfehlung   | Begründung  | Umsetzung im Prototyp „SmartSeal“  |
|--|---|--|
| <b>Kavität für die Unterbringung der Sensoren und der Auswerteelektronik</b>                           |   |  |
| Möglichst viel Material unter Tribokontakt beibehalten!<br>→ Möglichst kleine Kavität                  | Die Wärmeabfuhr aus dem Tribokontakt soll nicht verschlechtert werden. Deswegen soll möglichst viel Querschnittsfläche für die Wärmeleitung erhalten werden.  | Nut für Sensoren in Achsrichtung (Breite 5 mm, verbleibende Wandstärke zum Tribokontakt 2 mm) durch Stoßen herstellen.<br>Weitere Kavitäten zur Unterbringung der Auswerteelektronik axial zum Kontaktbereich versetzen. |
| <b>Datenverarbeitung</b>   |   |  |
| Separaten AD-Wandler verwenden mit mind. 15 Bit effektiver Auflösung                                   | Mehr Kanäle und höhere Auflösung, als bei üblichen Mikrocontrollern um eine Temperaturauflösung von 0,1 K zu erhalten.  | AD 7124-8 von Analog Devices   |
| Berechnung der Temperatur am PC aus übertragenen Rohdaten des Analog-Digital-Wandlers                  | Genauere Berechnung der Temperatur möglich. Fitting geht schneller.   | Rohdaten des AD-Wandlers übertragen.   |
| Geeignetes Lot und Lötverfahren wählen   | Kein Schmelzen im Betrieb!  | Sn96.5Ag3.0Cu0.5   |
| Auswerteelektronik platzsparend in ringförmiger Kavität unterbringen und bei Montage nicht beschädigen | Für die Unterbringung steht nur wenig Bauraum zur Verfügung (siehe „Kavität“). Damit dieser ausgenutzt werden kann, ist eine Auswerteelektronik auf flexiblem oder vorgeformtem Träger vorteilhaft. | Flexible Leiterplatte oder 3D-MID  |

**Design-Guideline Temperatur-Sensor**  
**Auslegung, Dimensionierung und Konzeption eines**  
**sensorintegrierenden Maschinenelements zur**  
**Temperaturüberwachung eines Tribokontakts**

IMA-TechSheet #104185v1



| Empfehlung  | Begründung  | Umsetzung im Prototyp „SmartSeal“  |
|---|---|--|
| <b>Datenübertragung</b>   |   |  |
| Funkstandard wählen mit: <ul style="list-style-type: none"> <li>• sicherer Datenübertragung bei geforderter Relativgeschwindigkeit</li> <li>• niedrigem Leistungsbedarf</li> <li>• Robustheit gegenüber Störeinflüssen</li> </ul> | Die Datenübertragung muss zuverlässig und energieeffizient sein.  | Bluetooth Low Energy (bis 9000 rpm bei $\varnothing$ 60 mm für Sendeeinheit erfolgreich getestet)  |
| Datenübertragungsrate an die Änderungsrate der Temperatur anpassen  | Bezogen auf den Energieverbrauch sollte die Datenübertragungsrate so niedrig wie akzeptabel gewählt werden.   | 1 Hz   |
| Keine Hindernisse in Funkstrecke  | Hindernisse, insbesondere metallische Gegenstände in Umgebung der Sendeantenne reduzieren die Signalstärke maßgeblich.  | Direkter Sichtkontakt zwischen Sender und Empfänger, Abstand ca. 50 mm   |
| <b>Energieversorgung</b>  |   |  |
| Möglichst geringen Energieverbrauch der Elektronik anstreben  | Je weniger Leistung das Sensorsystem verbraucht, umso länger kann es mit begrenzter Energie (z.B. Batteriebetrieb) funktionieren bzw. umso einfacher lässt es sich dauerhaft anderweitig versorgen. | Reduzierte Datenübertragungsrate (s.o.)<br>Funkstandard mit geringer Sendeleistung (s.o.)<br>Energiesparender Mikrokontroller (ublox, NINA-B306)<br>Gemessener Energieverbrauch: 43 mW |
| Langzeitbetrieb ermöglichen   | Energyharvesting auf Basis von Temperaturgradienten nicht ausreichend   | Noch nicht gelöst. Möglicher (bislang noch nicht getesteter) Lösungsansatz: Induktive Übertragung  |
| Bei Einsatz von Batterien Umgebungstemperatur beachten  | Die Lebensdauer von Batterien sinkt erheblich mit Zunahme der Umgebungstemperatur. Deswegen Unterbringung der Batterien in Bereich mit geringerer Temperatur.                                       | Bei Prototypen-Test am Prüfstand:<br>Unterbringung in separatem Gehäuse auf Luftseite  |



## Weiterführende Informationen

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Industrielle  
Gemeinschaftsforschung



Diese Design Guideline entstand im Forschungsprojekt „Intelligente Wellen-Dichtungen mittels 3D-MID - Sensor-Integration (SmartSeal)“ (IGF-Nr. 22854). Dieses Projekt der Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Weiterführende Informationen wie z.B. die vollständigen Mess- und Simulationsergebnisse des Forschungsprojekts sind im Abschlussbericht [4] dokumentiert.

## Autoren

Christoph Olbrich (Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart),

Niklas Piechulek (Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg),

Simon Feldmeth (Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart)

Frank Bauer (Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart)

Jörg Franke (Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg),

## Literaturverzeichnis

- [1] **Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente:** *Möglichkeiten zur Reduktion der Kontakttemperatur bei Radial-Wellendichtungen*. Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (Hrsg.), IMA-TechSheet, V1, #104180, Stuttgart, URL: <https://www.ima.uni-stuttgart.de/dokumente/forschung/dichtungstechnik/dienstleistungen/104180.pdf>.
- [2] **Feldmeth, S.:** *Simulative Bestimmung der Temperatur im Dichtkontakt von Radial-Wellendichtungen*. Dissertation, 2025, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Stuttgart, URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:93-opus-ds-161500>.
- [3] **Hannss, J.; Grün, J.; Olbrich, C.; Feldmeth, S.; Bauer, F.:** *Multiphase Conjugate Heat Transfer Analyses on the Assembly Situation of Rotary Shaft Seals*. Applied Sciences. 2023 , URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/19/11026>.
- [4] **Olbrich, C.; Feldmeth, S.; Piechulek, N.; Bauer, F.; Franke, J.:** *SmartSeal - Intelligente Wellen-Dichtungen mittels 3D-MID-Sensor-Integration*, Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID, Abschlussbericht, Vorhaben 22854 N/1, Stuttgart, 2026.