

Handbuch

zur WebApp

Herausgeber:

Institut für Maschinenelemente (IMA)
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart

<http://www.ima.uni-stuttgart.de>

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Simon Feldmeth
Tel. 0711-685-66186
simon.feldmeth@ima.uni-stuttgart.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
1 Vorwort	1
1.1 Ziel von InsECT	1
1.2 Bedeutung des Namens	2
1.3 Versionsnummerierung	2
1.4 Lizenzbedingungen	3
1.5 Hinweise zur Beta-Version	3
1.6 Beteiligte Personen	3
1.7 Ansprechpartner	4
2 Bestimmungsverfahren von InsECT	5
2.1 Einstufige Bestimmungsverfahren	5
2.1.1 Faustformel mit Umfangsgeschwindigkeit	5
2.2 Zweistufige Bestimmungsverfahren	6
2.2.1 Iterative Berechnung	7
2.2.2 Bestimmungsverfahren für die Reibleistung	7
2.2.2.1 Messung der Reibleistung	7
2.2.2.2 Gümbelkurven-Reibmodell	7
2.2.2.3 Engelke-Verfahren für die Reibleistung	10
2.2.3 Bestimmungsverfahren für die Temperaturüberhöhung im Kontaktbereich	10
2.2.3.1 ExACT-Gleichung	11
2.2.3.2 Engelke-Verfahren für die Temperaturüberhöhung	17
2.2.3.3 Empirisches Modell (BA-Schwenk)	17
3 Bedienung von InsECT	19
3.1 Starten von InsECT	19
3.2 Dateneingabe	19
3.3 Auswahl der Bestimmungsverfahren	21
3.4 Berechnung und Ergebnisausgabe	21
4 FAQ	22
5 Literaturverzeichnis	23
6 Anhang	25

6.1 Änderungsprotokoll (Changelog)	25
6.2 Dauerlaufprüfstände am IMA	25
7 Platz für Notizen.....	27

1 Vorwort

InsECT wird seit Mitte 2015 am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart im Rahmen des von der DFG¹ geförderten Forschungsprojekts „Multiskalen-Simulationsmodell zur Temperaturvorhersage im Dichtsystem Radial-Wellendichtung“ (HA 2251/27-1) entwickelt.

Seit Ende des DFG-Forschungsprojekts (31.05.2016) wird InsECT aus Eigenmitteln des IMA weiterentwickelt.

1.1 Ziel von InsECT

Ziel von InsECT ist es, eine schnelle, einfache und trotzdem relativ treffsichere Abschätzung der Kontakttemperatur bei Radial-Wellendichtringen (RWDR) zu ermöglichen.

Prinzipiell kann die Kontakttemperatur auf drei Arten bestimmt werden:

- **Messungen an einem Prüfstand:** Diese Methode ist sehr genau, aber auch sehr aufwendig. Sie steht nur größeren Dichtungsherstellern und Forschungsinstituten wie z.B. dem Institut für Maschinenelemente an der Uni Stuttgart zur Verfügung.
- **Simulation:** Diese Methode liefert - bei einem entsprechend realitätsnahen Simulationsmodell - ebenfalls sehr genaue Ergebnisse. Für die Simulation ist eine entsprechende Simulationssoftware und umfassendes Know-How erforderlich, so dass diese Methode ebenfalls nur selten zur Anwendung kommt.
- **Abschätzungen:** Für viele praktische Anwendungsfälle ist es ausreichend, die Temperatur im Kontaktbereich nicht exakt, sondern nur näherungsweise zu bestimmen. Hierzu wurden im Laufe der Zeit verschiedene Abschätzverfahren entwickelt, die eine Bestimmung der Kontakttemperatur ohne Hilfsmittel erlauben.

Die bestehenden Abschätzverfahren sind aufgrund ihres zumeist sehr einfachen Ansatzes relativ ungenau. Deshalb wurde im DFG-Forschungsprojekt „Multiskalen-Simulationsmodell zur Temperaturvorhersage im Dichtsystem Radial-Wellendichtung“ (HA 2251/27-1) das erweiterte Abschätzverfahren „ExACT“ entwickelt. Dieses bietet aufgrund seines etwas komplexeren und physikalisch motivierten Ansatzes – im Vergleich zu den bisherigen Abschätzverfahren – bei relativ geringem Mehraufwand eine deutlich höhere Genauigkeit, Bild 1.1.

¹ DFG = Deutsche Forschungsgemeinschaft, <http://www.dfg.de/>

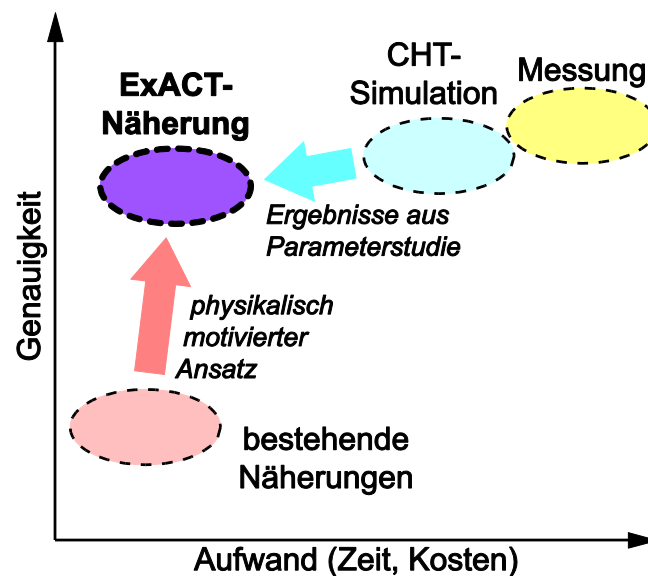


Bild 1.1: Vergleich verschiedener Methoden zur Bestimmung der Kontakttemperatur bei RWDR hinsichtlich Aufwand und Genauigkeit

InsECT soll Anwendern von RWDR (z.B. Konstrukteuren) das ExACT-Näherungsverfahren sowie andere gebräuchliche Abschätzverfahren für die Kontakttemperatur in Form eines intuitiven Computerprogramms zugänglich machen.

1.2 Bedeutung des Namens

Der Name InsECT leitet sich aus der Abkürzung des englischen Verwendungszwecks ab:

Instrument for Estimating the Contact Temperature at Radial Lip Seals

1.3 Versionsnummerierung

Die Versionsnummer entspricht dem Erstelldatum im Format „Jahr.Monat.Tag“.

Beispiel: Die Version „16.03.24“ wurde am 24. März 2016 erstellt.

Beta-Versionen sind nur für Testzwecke gedacht und durch die Bezeichnung „beta-“ vor der eigentlichen Versionsnummer gekennzeichnet, z.B. „beta-16.04.01“.

Hinweis

Die wichtigsten Änderungen zwischen den Versionen (Erweiterungen und Fehlerkorrekturen) sind im Änderungsprotokoll (Abschnitt 6.1, S. 25) dokumentiert.

1.4 Lizenzbedingungen

Die DFG empfiehlt, Forschungsergebnisse für eine produktive Nachnutzung unter offenen Lizenzen zu veröffentlichen². Deshalb wird InsECT, das im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsprojekts entwickelt wird, unter der GNU General Public License (GPL v3) veröffentlicht.

GNU General Public License (Version 3)

Das Programm InsECT ist Freie Software: Sie können es unter den Bedingungen der von der Free Software Foundation veröffentlichten GNU General Public License Version 3 – oder (nach Ihrer Wahl) jeder neueren Version dieser Lizenz – weiterverbreiten und/oder modifizieren.

InsECT wird in der Hoffnung bereitgestellt, dass es nützlich sein wird, aber OHNE JEDE GEWÄHRLEISTUNG – sogar ohne die implizite Gewährleistung der MARKTFÄHIGKEIT oder EIGNUNG FÜR EINEN BESTIMMTEN ZWECK.

Für weitere Details siehe die GNU General Public License.

Sie sollten eine Kopie der GNU General Public License zusammen mit diesem Programm erhalten haben. Falls nicht, siehe <http://www.gnu.org/licenses/>.

1.5 Hinweise zur Beta-Version

Die zusammen mit diesem Handbuch veröffentlichte Beta-Version von InsECT ist nur für Testzwecke gedacht. Die Bereitstellung der Beta-Version erfolgt ohne jegliche Gewährleistung. Für Schäden, die aus der Benutzung resultieren, übernehmen die Autoren keine Haftung.

1.6 Beteiligte Personen

Zur Entwicklung von InsECT haben folgende Personen beigetragen (Nennung in alphabetischer Reihenfolge):

- Dr.-Ing. Frank Bauer [Leiter des Bereichs Wellendichtungen]
- Dipl.-Ing. Simon Feldmeth [Bearbeiter des DFG-Forschungsprojekts HA 2251/27-1]
- Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Haas [Leiter des Fachbereichs Dichtungstechnik am IMA]
- Susanne Jaekel B.Sc. [Programmtest und Dokumentation, studentische Hilfskraft]
- Christoph Schwenk B.Sc. [Programmierung von InsECT, studentische Hilfskraft]

² http://www.dfg.de/foerderung/info_wissenschaft/2014/info_wissenschaft_14_68/index.html

1.7 Ansprechpartner

Bei Fragen und Anmerkungen zu InsECT wenden Sie sich bitte direkt an:

Herrn Dipl.-Ing. Simon Feldmeth
Tel. 0711-685-66186
Fax 0711-685-56186
simon.feldmeth@ima.uni-stuttgart.de

Universität Stuttgart
Institut für Maschinenelemente (IMA)
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart

Über Rückmeldungen von Anwendern (gerne auch über unseren Fragebogen) freuen wir uns!

2 Bestimmungsverfahren von InsECT

Bevor die Bedienung von InsECT in Kapitel 3 beschrieben wird, werden in diesem Kapitel die theoretischen Hintergründe erläutert.

Für die Abschätzung der Temperatur im Kontaktbereich von RWDR und Welle stehen in der Software InsECT mehrere Bestimmungsverfahren zur Verfügung. Diese unterscheiden sich hinsichtlich des Ansatzes, der zugrundeliegenden Annahmen (d.h. Vereinfachungen) sowie der benötigten Eingabe-Parameter und der zu erwartenden Genauigkeit.

Bei den mit InsECT ermittelten Kontakttemperaturen und Reibleistungen handelt es sich immer um Abschätzungen! Werden im Folgenden andere Bezeichnungen, wie z.B. „Bestimmung“, „Ermittlung“ oder „Berechnung“ verwendet, sind diese immer als näherungsweise Vorhersagen zu verstehen, die zwangsläufig mit einer Unsicherheit behaftet sind.

Im Folgenden werden die in InsECT implementierten Bestimmungsverfahren kurz vorgestellt.

2.1 Einstufige Bestimmungsverfahren

Bei den einstufigen Bestimmungsverfahren wird aus den Eingangsgrößen direkt die Temperaturüberhöhung bzw. die Temperatur im Kontaktbereich ermittelt, Bild 2.2.

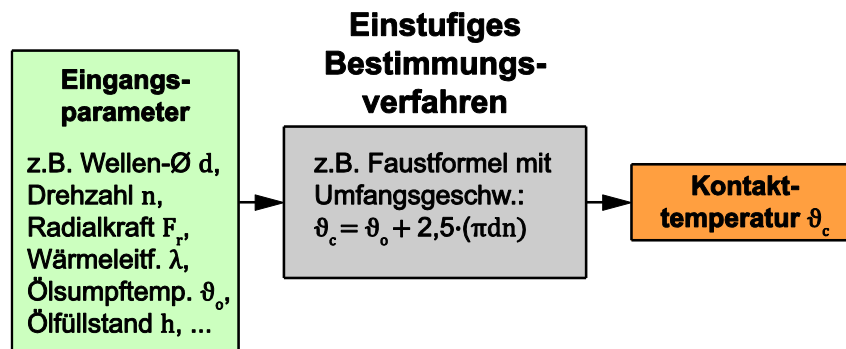


Bild 2.1: Berechnungsablauf bei einstufigen Bestimmungsverfahren für die Kontakttemperatur

Derzeit ist in InsECT mit der „Umfangsgeschwindigkeits-Faustformel“ lediglich das gebräuchlichste einstufige Bestimmungsverfahren implementiert, das im Folgenden beschrieben wird.

2.1.1 Faustformel mit Umfangsgeschwindigkeit

Zu Vergleichszwecken ist in InsECT eine Faustformel integriert, die die Temperaturüberhöhung im Kontaktbereich einzig aus der Umfangsgeschwindigkeit der Welle bestimmt.

Bei Stahlwellen mit einem Durchmesser zwischen 40 und 80 mm ist die Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta$ in K etwa das 2,5-Fache der Umfangsgeschwindigkeit in m/s [MüHa15],

$$\Delta\vartheta = \vartheta_c - \vartheta_o = 2,5 \frac{Ks}{m} \cdot v_u. \quad (2.1)$$

Aufgrund des einfachen Ansatzes ist diese Faustformel lediglich für überschlägige Abschätzung bei Standardfällen einsetzbar.

Für größere Wellendurchmesser ist die tatsächliche Temperaturerhöhung tendenziell etwas kleiner als mit Gleichung (2.1) berechnet, bei kleineren Wellendurchmessern tendenziell etwas größer. Je größer der Wellendurchmesser, umso größer wird das Verhältnis von der für die Wärmeableitung nutzbaren Querschnittsfläche zur Mantelfläche, auf der die Reibwärme entsteht. Damit wird die Wärmeabfuhr mit zunehmendem Wellendurchmesser besser.

2.2 Zweistufige Bestimmungsverfahren

Bei den zweistufigen Bestimmungsverfahren wird die Temperaturerhöhung im Kontaktbereich nicht direkt ermittelt. Stattdessen wird in einem Zwischenschritt zuerst die dissipierte Reibleistung P_R , d.h. die abzuführende Reibwärme (bzw. der abzuführende Wärmestrom \dot{Q}), ermittelt. Basierend auf diesem Zwischenergebnis wird anschließend die Temperaturerhöhung im Kontaktbereich bestimmt, Bild 2.2.

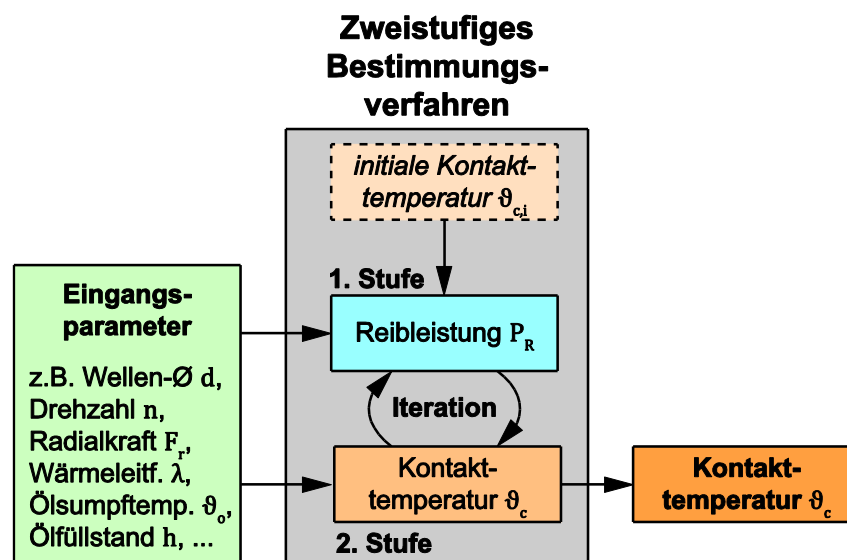


Bild 2.2: Berechnungsablauf bei zweistufigen Bestimmungsverfahren für die Kontakttemperatur

Möglichkeiten zur Bestimmung der Reibleistung werden in Abschnitt 2.2.2 vorgestellt, Verfahren zur Bestimmung der Kontakttemperatur in Abschnitt 2.2.3.

2.2.1 Iterative Berechnung

Zweistufige Bestimmungsverfahren erfordern in der Regel ein iteratives Lösungsverfahren, da sich Reibleistung und Temperaturüberhöhung gegenseitig beeinflussen („gekoppelt sind“). Ausgehend von einer Ausgangsannahme für die Kontakttemperatur („Initialisierung“) werden Reibleistung und Temperaturüberhöhung so lange abwechselnd berechnet, bis diese für die vorliegenden Betriebsparameter einen Gleichgewichtszustand erreichen und sich nicht mehr ändern.

Die iterative Berechnung erfolgt bei InsECT automatisch im Hintergrund, ohne dass der Anwender davon etwas mitbekommt. Unter üblichen Betriebsbedingungen sind ca. 10 Iterationen ausreichend [Eng11]. InsECT berechnet standardmäßig 100 Iterationen, da diese ohnehin in einem Sekundenbruchteil ablaufen.

2.2.2 Bestimmungsverfahren für die Reibleistung

Im Folgenden werden mehrere Möglichkeiten vorgestellt, die Reibleistung von RWDR mehr oder weniger genau zu bestimmen.

2.2.2.1 Messung der Reibleistung

Ist die Reibleistung eines Dichtsystems für einen bestimmten Betriebspunkt exakt bekannt (z.B. aus einer Reibmomentmessung an einem Prüfstand³), kann diese Messgröße direkt als Eingangswert für die Abschätzung der Kontakttemperatur verwendet werden.

Bei exakt bekannter Reibleistung ist keine iterative Berechnung erforderlich. Die Temperaturüberhöhung kann dann in der zweiten Stufe (vgl. Bild 2.2) direkt in einem Schritt ausgerechnet werden.

2.2.2.2 Gümbelkurven-Reibmodell

Ist die Reibleistung, die im Kontaktbereich eines Dichtsystems unter bestimmten Betriebsbedingungen entsteht, nicht exakt bekannt, muss sie abgeschätzt werden. Eine Möglichkeit hierzu stellt das sogenannte Gümbelkurven-Reibmodell dar, mit dessen Hilfe der Reibungskoeffizient μ für den Dichtkontakt ermittelt werden kann.

Bestimmung des Reibungskoeffizienten

Grundlage dieses empirischen Reibmodells ist die sogenannte Gümbelkurve des zu untersuchenden Dichtsystems. Die Gümbelkurve gibt einen empirischen Zusammenhang zwischen Schmierungs- und Reibungszustand des Dichtsystems wieder. Diese beiden Zustände werden jeweils durch eine dimensionslose Kennzahl beschrieben.

³ Reibmomentmessungen können vom Institut für Maschinenelemente (IMA) an der Universität Stuttgart als Dienstleistung durchgeführt werden. Für weitere Informationen wenden Sie sich an die in Abschnitt 1.7 (S. 4) genannte Ansprechperson.

Den Schmierzustand des Dichtsystems beschreibt die sogenannte Gümbelzahl G , die sich aus der dynamischen Viskosität η des abzudichtenden Fluids im Dichtspalt, der Winkelgeschwindigkeit ω der Welle sowie der mittleren Flächenpressung p_m zwischen Dichtkante und Welle ergibt,

$$G = \frac{\eta \cdot \omega}{p_m}. \quad (2.2)$$

Da die Viskosität des abzudichtenden Fluids stark temperaturabhängig ist, muss die Viskosität bei der jeweiligen Kontakttemperatur ϑ_c eingesetzt werden. Da auch die Radialkraft temperaturabhängig ist, muss für die mittlere Flächenpressung die Radialkraft F_r bei einer für den RWDR repräsentativen Temperatur (z.B. der Ölsumpftemperatur ϑ_o) eingesetzt werden,

$$G = \frac{\eta(\vartheta_c) \cdot \omega}{\frac{F_r(\vartheta_o)}{\pi d b}}. \quad (2.3)$$

Den Reibungszustand beschreibt der Reibungskoeffizient μ , der das Verhältnis aus Reibkraft zur Normalkraft ist. Die Reibkraft F_R wird aus dem Reibmoment M_R und dem Wellendurchmesser d ermittelt. Als Normalkraft wird die Radialkraft bei einer definierten Temperatur verwendet. Hierzu wird häufig die Raumtemperatur ϑ_{RT} herangezogen.

$$\mu = \frac{F_R}{F_r} = \frac{2 \cdot M_R}{d \cdot F_r(\vartheta_{RT})}. \quad (2.4)$$

In Bild 2.3 ist beispielhaft die Gümbelkurve für ein beliebig ausgewähltes Dichtsystem dargestellt.

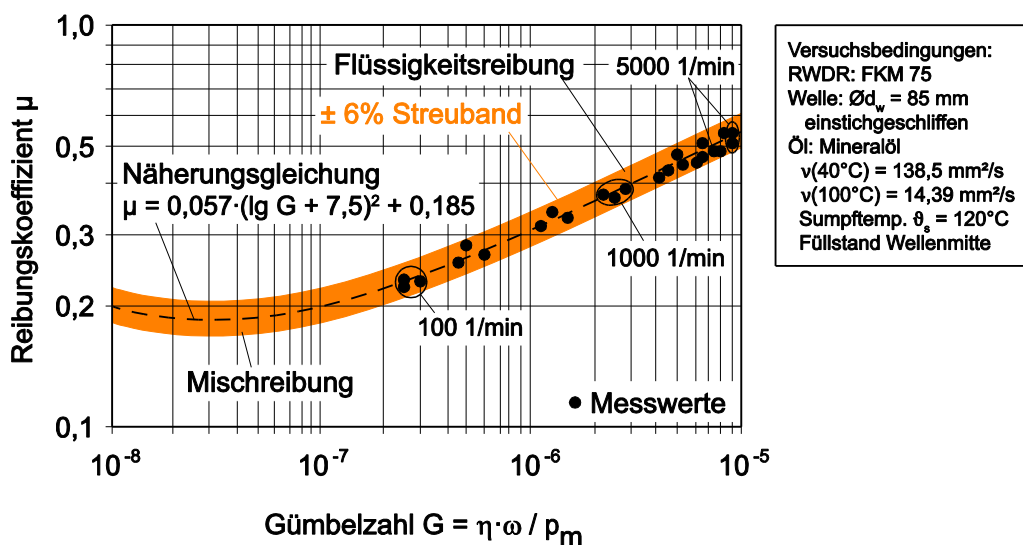


Bild 2.3: Exemplarische Gümbelkurve [FeBH14]

Der in Bild 2.3 dargestellte Zusammenhang zwischen Gümbelzahl und Reibungskoeffizient kann durch eine quadratische Gleichung angenähert werden [FeBH14],

$$\mu = A_1 \cdot (\lg G + A_2)^2 + A_3 . \quad (2.5)$$

Hierbei wird über die 3 Parameter A_1 , A_2 und A_3 die Näherungsgleichung sehr gut an die Versuchsdaten angepasst.

Hinweis

Der empirische Zusammenhang (d.h. die Parameter) muss für jedes Dichtsystem (Kombination aus RWDR, Welle und Öl) separat ermittelt werden, und ist nicht auf andere Dichtsysteme übertragbar. Alleine durch die Veränderung der Wellenoberfläche lässt sich der Verlauf der Gümbelkurve um den Faktor 3 verändert, Bild 2.4 [Jung12]!

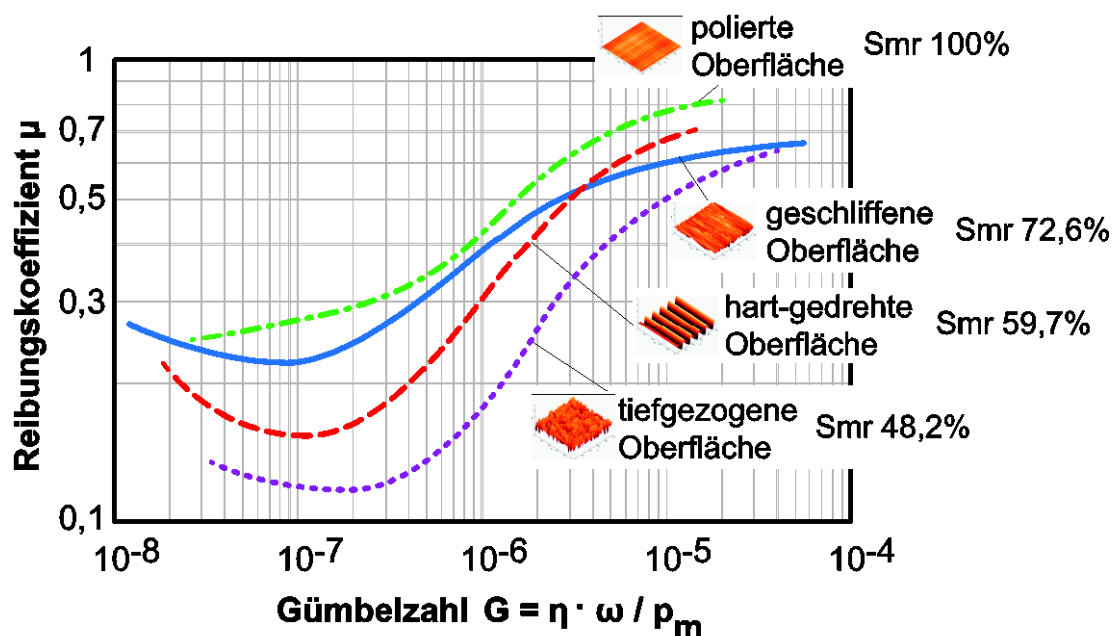


Bild 2.4: Einfluss der Oberflächentopographie auf den Verlauf der Gümbelkurve, nach [Jung12]

Bestimmung der Reibleistung

Mit dem aus der Gümbelkurve ermittelten Reibungskoeffizienten kann die Reibleistung berechnet werden,

$$P_R = v_u \cdot F_R = \pi n d \cdot \mu \cdot F_r(\vartheta_{RT}) . \quad (2.6)$$

Hierbei ist darauf zu achten, dass die Radialkraft bei derselben Temperatur verwendet wird, mit der auch die Berechnung des Reibungskoeffizienten in der Gümbelkurve durchgeführt wurde (also beispielsweise die Raumtemperatur ϑ_{RT}).

Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Radialkraft

Mit zunehmender Temperatur nimmt die Radialkraft eines RWDRs ab. Diesem Effekt wird im Gümbelkurven-Reibmodell durch den sogenannten Radialkraft-Temperaturkoeffizienten α_{Fr} Rechnung getragen. Dieser Koeffizient (Einheit: N/K) gibt an, um wie viele N die Radialkraft bei einer Temperatursteigerung von 1 K abnimmt. Die Radialkraft $F_r(\vartheta)$ lässt sich mit diesem linearen Ansatz aus der Radialkraft bei Raumtemperatur $F_r(\vartheta_{RT})$ und dem Radialkraft-Verlustkoeffizienten für jede beliebige Temperatur ϑ berechnen,

$$F_r(\vartheta) = F_r(\vartheta_{RT}) - \alpha_{Fr}(\vartheta - \vartheta_{RT}). \quad (2.7)$$

Für die Ermittlung des Radialkraft-Temperaturkoeffizienten muss die Radialkraft des RWDR bei zwei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt werden. Hierzu wird ein Radialkraftmessgerät mit Temperierkammer empfohlen⁴.

Ist der Radialkraft-Temperaturkoeffizient nicht bekannt, sollte er zu $\alpha_{Fr} = 0$ N/K gesetzt werden. Dieser Wert entspricht einer temperaturunabhängigen Radialkraft.

2.2.2.3 Engelke-Verfahren für die Reibleistung

Das von Engelke vorgestellte Berechnungsmodell [Eng11] lässt sich in ein Teilmodell für die Reibleistung und ein Teilmodell für die Verlustleistung untergliedern.

Hinweis

Das Bestimmungsverfahren von Engelke für die Reibleistung ist derzeit noch nicht in InsECT enthalten, soll aber in einer zukünftigen Version integriert werden.

Wenn Sie das Engelke-Verfahren für die Reibleistung in InsECT nutzen wollen, teilen Sie dies bitte den Entwicklern mit (siehe Abschnitt 1.7 auf S.4), damit die Weiterentwicklung von InsECT bedarfsgerecht priorisiert werden kann.

2.2.3 Bestimmungsverfahren für die Temperaturüberhöhung im Kontaktbereich

Wie auch für die Reibleistung, existieren mehrere Verfahren, um aus der Reibleistung, den Eigenschaften des Dichtsystems und den Betriebsbedingungen die Kontakttemperatur ϑ_c abzuschätzen.

Nahezu alle Verfahren verwenden dabei die Temperaturüberhöhung $\Delta\vartheta$, die den Temperaturunterschied zwischen Kontaktbereich (ϑ_c) und Ölsumpf (ϑ_o) angibt,

⁴ Das Institut für Maschinenelemente (IMA) an der Universität Stuttgart verfügt seit kurzem über ein Radialkraftmessgerät mit Temperierkammer und bietet an diesem Radialkraftmessungen als Dienstleistung an. Für weitere Informationen wenden Sie sich an die in Abschnitt 1.7 (S. 4) genannte Ansprechperson.

$$\Delta\vartheta = \vartheta_c - \vartheta_o . \quad (2.8)$$

Aus der Ölsumpftemperatur ϑ_o und der Temperaturüberhöhung $\Delta\vartheta$ wird dann die Kontakttemperatur ϑ_c ermittelt,

$$\vartheta_c = \vartheta_o + \Delta\vartheta = \vartheta_o + f(\dots) . \quad (2.9)$$

Für die Bestimmung der Temperaturüberhöhung können die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Verfahren eingesetzt werden.

2.2.3.1 ExACT-Gleichung

Die ExACT-Gleichung zur Berechnung der Kontakttemperatur von Radialwellendichtungen wurde am Institut für Maschinenelemente (IMA) entwickelt, um über ein universelles Abschätzverfahren mit einem breiteren Anwendungsbereich zu verfügen.

Hierzu wurde aus der analytischen Lösung eines vereinfachten thermischen Ersatzmodells des Dichtsystems eine erweiterte Näherungsgleichung abgeleitet, die deutlich mehr Eingangsgrößen beinhaltet als andere Abschätzformeln. Die Abkürzung ExACT steht hierbei für die englische Bezeichnung der erweiterten Näherungsgleichung: **Ex**tended **A**pproximation of the **C**ontact **T**emperature of Radial Lip Seals.

Auf die Herleitung der ExACT-Gleichung wird an dieser Stelle bewusst verzichtet. Stattdessen erfolgt nur eine Beschreibung.⁵

In der einfachsten Form stellt die ExACT-Gleichung einen linearen Zusammenhang zwischen der Temperaturüberhöhung $\Delta\vartheta$ zwischen Kontaktbereich (Temperatur ϑ_c) und Ölsumpf (Temperatur ϑ_o) und der auf den Umfang πd bezogenen Reibleistung P_R dar. Die Proportionalitätskonstante wird als Wärmeabfuhr-Widerstand R_o bezeichnet,

$$\Delta\vartheta = \vartheta_c - \vartheta_o = \frac{P_R}{\pi d} \cdot R_o . \quad (2.10)$$

Wärmeabfuhr-Widerstand

Der Wärmeabfuhrwiderstand R_o drückt aus, wie stark die Temperatur im Kontaktbereich bei einer bestimmten Reibleistung ansteigt. Je größer der Wärmeabfuhrwiderstand ist, umso schlechter wird die entstehende Reibwärme an die Umgebung abgeführt und umso höher ist die Temperaturüberhöhung im Kontaktbereich.

⁵ Die Herleitung und weitere ausführliche Hintergrundinformationen zur ExACT-Gleichung wurden auf der ANSYS Conference 2015 in Bremen vorgestellt [FeBH15]. Der Konferenzbeitrag ist als PDF-Datei auf Anfrage erhältlich (Ansprechpartner siehe Abschnitt 1.7 auf S. 4).

Der Wärmeabfuhrwiderstand R_o besitzt die Einheit $\text{K}/(\text{Wm})$ und ist eine Funktion der Wärmeleitfähigkeit λ_s der Welle, der effektiven Wärmeleitfähigkeit $\bar{\lambda}_o$ des Fluidgemisches auf der Ölseite des RWDR sowie der Nußelt-Zahl Nu , die den Wärmeübergang von der Welle an das Fluidgemisch beschreibt,

$$R_o = \frac{2}{\sqrt{Nu \cdot \lambda_s \cdot \bar{\lambda}_o}}. \quad (2.11)$$

Die drei Einflussgrößen beschreiben die einzelnen „Etappen“ der Wärmeabfuhr aus dem Kontaktbereich:

- Die Wärmeleitfähigkeit λ_s der Welle beschreibt die erste Etappe – die Leitung in axialer Richtung durch die Welle.
- Die Nußelt-Zahl Nu beschreibt die zweite Etappe – den Wärmeübergang von der Welle auf das umgebende Fluidgemisch.
- Die effektive Wärmeleitfähigkeit $\bar{\lambda}_o$ des Fluidgemischs beschreibt die dritte Etappe – die Abfuhr der Reibwärme durch das Fluidgemisch (Öl/Luft).

Je größer die drei Einflussgrößen Wellen-Wärmeleitfähigkeit λ_s , Nußelt-Zahl Nu und effektive Wärmeleitfähigkeit $\bar{\lambda}_o$ des Fluidgemisches, umso besser wird die Wärmeabfuhr aus dem Kontaktbereich und umso geringer werden der Wärmeabfuhrwiderstand und damit die Temperaturüberhöhung im Kontaktbereich.

Die drei Einflussgrößen können wie folgt bestimmt werden.

Nußelt-Korrelation

Wie in der Wärmeübertragung üblich, wird die Nußelt-Zahl aus einer empirisch abgeleiteten Funktion ermittelt, da analytische Lösungen nur für ganz einfache Fälle der Wärmeübertragung existieren. Um das Bestimmungsverfahren möglichst einfach zu halten, wird die Nußelt-Zahl lediglich als Funktion der Reynolds-Zahl Re dargestellt,

$$Nu = a \cdot Re^m \quad (2.12)$$

Die Reynolds-Zahl wird im vorliegenden Fall mit der Umfangsgeschwindigkeit v_u der Welle, dem Wellendurchmesser d und der effektiven kinematischen Viskosität $\bar{\nu}_o$ des Fluidgemischs (siehe Gleichung (2.15) im Folgenden) definiert,

$$Re = \frac{v_u \cdot d}{\bar{\nu}_o} \quad (2.13)$$

Die beiden Parameter a und m der Nußelt-Korrelation hängen von der konstruktiven Gestaltung des Dichtungsumfeldes (insbesondere der Gestaltung der Welle) ab und können stark variieren. In Tabelle 2.3 (S. 16) sind Richtwerte angegeben, die mittels CHT⁶-Simulation für den Versuchsaufbau an den Dauerlaufprüfständen des IMAs ermittelt worden. Eine Skizze des zugrundeliegenden Simulationsmodells ist im Anhang (Abschnitt 0) dargestellt.

Wärmeleitfähigkeit des Wellenwerkstoffs

Die Wärmeleitfähigkeit des Wellenwerkstoffs ist dem Datenblatt des Herstellers bzw. Lieferanten zu entnehmen. Wärmeleitfähigkeiten für gängige Konstruktionswerkstoffe sind auch im VDI-Wärmeatlas [VDI13] enthalten. Grobe Anhaltswerte gibt Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Wärmeleitfähigkeit von Werkstoffen

Werkstoff-Bezeichnung	Werkstoff-Nummer	Wärmeleitfähigkeit [W/m·K]		Quelle
100Cr6	1.3505	41	bei 20°C	[SFB570-C1]
16MnCr5	1.7131	44	bei 20°C	[DEW1.7131]
C45E	1.1191	47 bis 50	bei 20°C	[VDI13]
X5CrNi18-10 (V2A)	1.4301	15	bei 20°C	[VDI13]
AlCu4PbMgMn	EN AW-2007	130-160	?	[GAW2007]

Wärmeleitfähigkeit bei Mehrphasenströmung

Auf der Ölseite des RWDR liegt in der Regel eine Mehrphasenströmung vor (z.B. Öl und Luft). In Anlehnung an den „Volume of Fluid“-Ansatz der CFD⁷ werden für die ExACT-Gleichung die effektiven Stoffwerte (gekennzeichnet mit einem „Überstrich“) durch eine Mittelung gebildet.

Für die effektive Wärmeleitfähigkeit $\bar{\lambda}_o$ und die effektive kinematische Viskosität $\bar{\nu}_o$ des Fluidgemischs gelten:

$$\bar{\lambda}_o = h_{rel}\lambda_{oil} + (1 - h_{rel})\lambda_{air} , \quad (2.14)$$

$$\bar{\nu}_o = h_{rel}\nu_{oil}(\vartheta_o) + (1 - h_{rel})\nu_{air} . \quad (2.15)$$

⁶ CHT = Conjugate Heat Transfer, gekoppelte Strömungs- und Wärmeübertragungssimulation, bei der der Wärmetransport nicht nur im strömenden Fluid, sondern auch in den umgebenden Festkörpern simuliert wird.

⁷ CFD = Computational Fluid Dynamics, numerische Strömungssimulation

Bei der Mittelung werden die Stoffwerte für Luft (Index „air“) und Öl (Index „oil“) mit der relativen Füllstandshöhe h_{rel} gewichtet. Diese gibt an, zu welchem Anteil die Welle in das Öl eintaucht, Bild 2.5.

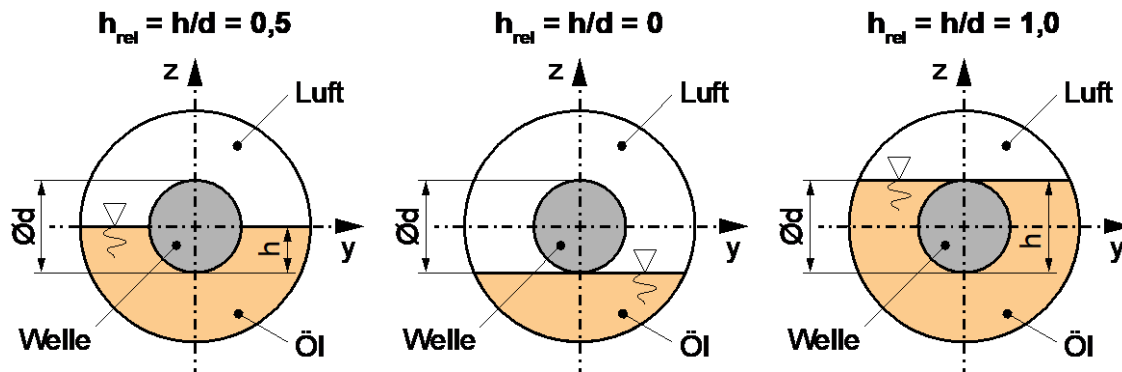


Bild 2.5: Definition der relativen Füllstandshöhe

Ubbelohde-Walther-Gleichung

Die Temperaturabhängigkeit der Ölviskosität wird über die Ubbelohde-Walther-Gleichung beschrieben, die einen Zusammenhang zwischen der kinematischen Ölviskosität ν_{oil} und der absoluten Temperatur $T = \vartheta + 273,15$ K herstellt,

$$\lg(\lg \nu_{oil} + 0,8) = K_v - m \cdot \lg T. \quad (2.16)$$

Die beiden stoffspezifischen Konstanten m und K_v können aus den Viskositätswerten bei zwei unterschiedlichen Temperaturen berechnet werden, vgl. DIN 51563 [DIN51563] und DIN 53017 [DIN53017]. Üblicherweise werden hierzu die Viskositätswerte bei 40 °C und 100 °C verwendet, die im Datenblatt des Öls angegeben sind, Bild 2.6.

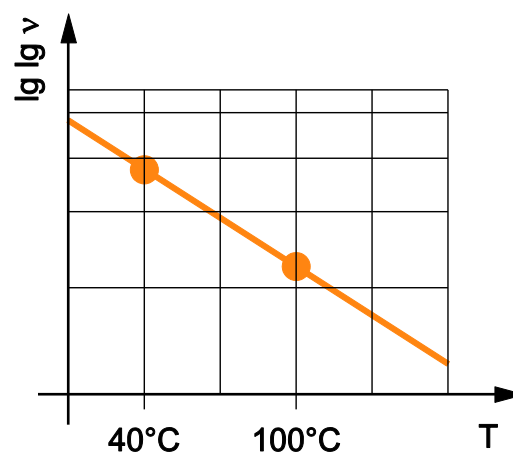


Bild 2.6: Prinzipielles Temperatur-Viskositäts-Verhalten von Öl

Die Ubbelohde-Walther-Gleichung (2.16) wird an zwei Stellen verwendet, um das Temperatur-Viskositätsverhalten des abzudichteten Fluids zu berücksichtigen:

- Zur Bestimmung der effektiven kinematischen Viskosität $\bar{\nu}_o$ des Fluidgemischs auf der Ölseite nach Gleichung (2.15). Hierbei wird die Ölsumpftemperatur ϑ_o verwendet.
- Zur Bestimmung der dynamischen Viskosität $\eta(\vartheta_c)$ des Öls im Kontaktbereich (bei der dortigen Temperatur ϑ_c), die für die Berechnung der Gümbelzahl in Gleichung (2.3) benötigt wird. Hierbei wird zusätzlich der Zusammenhang zwischen kinematischer und dynamischer Viskosität und der Dichte ρ_{oil} verwendet,

$$\eta(\vartheta_c) = \nu_{oil}(\vartheta_c) \cdot \rho_{oil} . \quad (2.17)$$

Korrekturterm

Bei der Ableitung der ExACT-Gleichung wurde angenommen, dass die Reibwärme ausschließlich in Richtung Ölseite erfolgt. Diese Annahme muss aufgegeben werden, wenn auch in Richtung Luftseite eine gewisse Wärmemenge abgeführt wird. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn – wie bei den Dauerlaufprüfständen am IMA – die Welle luftseitig von viel kühler Luft umgeben ist. Um solche Fälle abbilden zu können, ist in die ExACT-Gleichung (2.10) ein zusätzlicher Korrekturterm eingefügt, der auch die Wärmeabfuhr in Richtung Luftseite berücksichtigt,

$$\Delta\vartheta = \vartheta_c - \vartheta_o = \frac{P_R}{\pi d} \cdot K_o \cdot R_o - K_a(\vartheta_o - \vartheta_a) . \quad (2.18)$$

Hierzu wird der Wärmeabfuhr-Widerstand mit einem Korrekturkoeffizient K_o multipliziert. Der zusätzliche Term am Ende von Gleichung (2.18) bewirkt eine Reduzierung der Temperaturüberhöhung, die umso größer ist, je größer die Differenz zwischen Ölsumpf- und Umgebungslufttemperatur ϑ_a ist. Der Koeffizient K_a gibt an, wie stark der Effekt der luftseitigen Kühlung ist.

Die beiden Koeffizienten K_o und K_a hängen von der konstruktiven Gestaltung des Dichtungsumfeldes (insbesondere des luftseitigen) ab und können variieren. In Tabelle 2.3 (S. 16) sind Richtwerte angegeben, die mittels CHT⁸-Simulation für den Versuchsaufbau an den Dauerlaufprüfständen des IMAs ermittelt wurden.

Wird in Richtung Luftseite (fast) keine Wärme abgeführt, kann $K_a = 0$ und $K_o = 1$ gesetzt werden. In diesem Fall entspricht Gleichung (2.18) wieder (2.10).

Vollständige ExACT-Gleichung

Zusammengesetzt ergibt sich die ExACT-Gleichung zu:

⁸ CHT = Conjugate Heat Transfer, gekoppelte Strömungs- und Wärmeübertragungssimulation, bei der der Wärmetransport nicht nur im strömenden Fluid, sondern auch in den umgebenden Festkörpern simuliert wird.

$$\Delta\vartheta = \vartheta_c - \vartheta_o = \frac{P_R}{\pi d} \cdot K_o \cdot \frac{2}{\sqrt{a \cdot \left(\frac{v_u \cdot d}{\bar{v}_o}\right)^m \cdot \lambda_s \cdot \bar{\lambda}_o}} - K_a(\vartheta_o - \vartheta_a). \quad (2.19)$$

$$\bar{\lambda}_o = h_{rel}\lambda_{oil} + (1 - h_{rel})\lambda_{air} \quad (2.14)$$

$$\bar{v}_o = h_{rel}v_{oil}(\vartheta_o) + (1 - h_{rel})v_{air} \quad (2.15)$$

Werden die Viskosität der Luft sowie die Wärmeleitfähigkeit von Luft und Öl als konstant angenommen, gehen insgesamt 8 Eingangsgrößen in die Bestimmung der Temperaturüberhöhung ein, Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2: Variable Einflussgrößen für die ExACT-Gleichung

Einflussgröße	Formelzeichen	Beschreibung
Ölsumpftemperatur	ϑ_o	
Umgebungsluft-Temperatur	ϑ_a	
Reibleistung	P_R	
Wellendurchmesser	d	
Umfangsgeschwindigkeit	v_u	
Wärmeleitfähigkeit der Welle	λ_s	
Kinematische Viskosität des Öls (im Sumpf)	v_{oil}	Temperaturabhängigkeit mit Ubbelohde-Walther-Gleichung
Füllstandshöhe des Ölsumpfs	h_{rel}	Definition siehe Bild 2.5

Für die 4 in der ExACT-Gleichung enthaltenen Parameter gelten bei den Dauerlaufprüfständen des IMA (Beschreibung in Abschnitt 6.1) und ähnlich gestalteten Dichtungsumfeldern die in Tabelle 2.3 aufgeführten Parameter. Für Dichtungsumfelder, deren Gestalt deutlich abweicht, sind die Parameter neu zu bestimmen.

Tabelle 2.3: Parameter für die ExACT-Gleichung (für IMA-Dauerlaufprüfstände)

Parameter	Formelzeichen	Wert
Koeffizient in Nußelt-Korrelation	a	25,37
Exponent in Nußelt-Korrelation	m	0,1774
Koeffizient des Wärmeabfuhr-Widerstands	K_o	1,032
Koeffizient des Korrekturterms	K_a	0,0694

2.2.3.2 Engelke-Verfahren für die Temperaturüberhöhung

Engelke verwendet in seinem Bestimmungsverfahren [Eng11] einen linearen Zusammenhang zwischen der Temperaturüberhöhung $\Delta\vartheta$ und der auf die Kontaktfläche πdb bezogenen Reibleistung P_R ,

$$\Delta\vartheta = 16,5 \frac{K}{W/mm^2} \cdot \frac{P_R}{\pi db}. \quad (2.20)$$

Als Proportionalitätskonstante gibt Engelke einen Wert von 16,5 Kmm²/W an, der aus Messungen am Universalprüfstand des IMKT⁹ der Universität Hannover ermittelt wurde. Dieser Ansatz ist deutlich einfacher als die in Abschnitt 2.2.3.1 beschriebene ExACT-Gleichung.

Wird Gleichung (2.20) des Engelke-Verfahrens umgeformt, zeigt sich eine starke Ähnlichkeit mit der einfachen ExACT-Gleichung (2.10):

$$\Delta\vartheta = \underbrace{16,5 \frac{K}{W/mm^2} \cdot \frac{1}{b} \cdot \frac{P_R}{\pi d}}_{\text{Engelke}} = \underbrace{R_o \cdot \frac{P_R}{\pi d}}_{\text{ExACT}}. \quad (2.21)$$

Anstelle des Wärmeabfuhr-Widerstands der ExACT-Gleichung tritt beim Engelke-Verfahren der Ausdruck

$$R_o = 16,5 \frac{K}{W/mm^2} \cdot \frac{1}{b}. \quad (2.22)$$

Dieser Ausdruck ist aufgrund der üblicherweise geringen Variation der Berührbreite quasi eine Konstante mit $R_o \approx 100 \text{ K/(W/mm)}$. Den Einfluss von Betriebsbedingungen und von der konstruktiven Gestaltung des Dichtungsumfeldes auf die Wärmeabfuhr kann das Engelke-Verfahren deshalb nicht berücksichtigen. Vom Einsatz des Engelke-Verfahrens für die Temperaturüberhöhung wird deshalb abgeraten – insbesondere dann, wenn Betriebsbedingungen und Dichtungsumfeld stark vom IMKT-Universalprüfstand abweichen.

2.2.3.3 Empirisches Modell (BA-Schwenk)

In seiner Bachelorarbeit entwickelte Schwenk [Schwe15] mittels Regressionsanalyse ein empirisches Modell für die Temperaturüberhöhung im Kontaktbereich von RWDR. Datenbasis bildete eine Parameterstudie mittels eines CHT-Simulationsmodells.

Werden beim Schwenk-Modell die Eingangsparameter außerhalb des Wertebereichs gewählt, der für die Regressionsanalyse herangezogen wurde, können utopische Kontakttemperaturen resultieren!

⁹ Institut für Maschinenkonstruktion und Tribologie, <http://www.imkt.uni-hannover.de/>

Zu Vergleichszwecken ist das Schwenk-Modell in InsECT implementiert. Da die Ansatzfunktion des Schwenk-Modells aber keinerlei physikalische Grundlage besitzt, liefert es im Vergleich zum ExACT-Näherungsmodell tendenziell ungenauere Ergebnisse.

Die Parameter des Schwenk-Modells können bislang nur im Quelltext verändert werden. Aufgrund der eingeschränkten Eignung wird von der Verwendung des Schwenk-Modells derzeit abgeraten.

3 Bedienung von InsECT

Nachdem im vorherigen Kapitel die theoretischen Grundlagen erläutert wurden, folgt in diesem Kapitel die Bedienungsanleitung für InsECT.

3.1 Starten von InsECT

Im Gegensatz zur Desktop-Version, die bis März 2017 entwickelt wurde, ist bei der Online-Version von InsECT keinerlei Installation mehr erforderlich.

Die Online-Version ist als Webanwendung „WebApp“ konzipiert. Dabei erfolgt die eigentliche Berechnung der Kontakttemperatur auf dem InsECT-Server. Die Dateneingabe und Ergebnisanzeige erfolgt über eine Webseite.

Für die Benutzung von InsECT werden benötigt:

- Ein IT-Endgerät (PC, Laptop, Tablet, Smartphone, ...) mit einem Browser (zur Darstellung der InsECT-Webseite)
- Eine Internet-Verbindung (zum Übertragen der Eingabewerte und der Berechnungsergebnisse)

Zur Benutzung von InsECT ist die Website <http://141.52.38.227/>¹⁰ aufzurufen.

3.2 Dateneingabe

Die Dateneingabe erfolgt in der Rubrik „Start“ (in der Navigationsleiste oben). Das Eingabefenster ist in drei Bereiche untergliedert, in die die Eingangsparameter eingetragen werden:

- Betriebszustand: Hier werden die Betriebsparameter Wellendrehzahl, relativer Ölfüllstand, Ölsumpf- und Außenlufttemperatur sowie die Konstruktionsmerkmale Wellendurchmesser und Wärmeleitfähigkeit der Welle angegeben.
- Reibungszustand: Hier wird entweder direkt die Reibleistung angegeben, oder Parameter, aus denen die Reibleistung abgeschätzt werden kann.
- Öl-Stoffwerte: Hier werden die Dichte, die kinematische Viskosität bei 2 Temperaturen sowie die Wärmeleitfähigkeit des abzudichtenden Öls angegeben.

Um die drei Bereiche nutzen zu können, müssen diese „ausgeklappt“ werden. Hierzu ist auf die Bereichsüberschrift („Betriebszustand“, „Reibungszustand“ oder „Öl-Stoffdaten“) oder das dahinter befindliche V-Symbol zu klicken.

¹⁰ Während der internen Beta-Tests erfolgt, läuft die InsECT-Webanwendung auf einem Server der bwCloud [<http://www.bw-cloud.org>] und ist nur vom IMA-Netz und dem eduROAM- und konferenz-WLAN der Universität Stuttgart aus erreichbar.

In der grafischen Benutzeroberfläche sind immer nur die Eingabefelder von den Parametern aktiv, die vom aktuell ausgewählten Abschätzverfahren benötigt werden. Die Eingabefelder von nicht benötigten Eingangsparametern sind ausgegraut, wie beispielsweise die Reibleistung in Bild 3.1.

The screenshot shows the main interface of the InsECT application. At the top, there is a navigation bar with links for 'InsECT', 'Start', 'Einstellungen', 'Info', 'Handbuch', 'Impressum', and 'Sprache'. Below this, the title 'InsECT - Abschätzung der Dichtspalttemperatur bei Radial-Wellendichtungen' is displayed. The interface is divided into several sections:

- Verfahren für die Temperatur:** A dropdown menu currently set to 'ExACT-Gleichung'.
- Verfahren für die Reibleistung:** A dropdown menu currently set to 'Guembelkurven-Reibmodell'.
- Betriebsbedingungen:** A section containing several input fields with numerical values and up/down arrows for adjustment:
 - Wellendrehzahl [1/min]: 3000
 - Wellendurchmesser [mm]: 80
 - relativer Ölfüllstand [%]: 50
 - Ölsumpftemperatur [°C]: 80
 - Wärmeleitfähigkeit der Welle [W/(m·K)]: 43
 - Außenlufttemperatur [°C]: 20
- Reibungszustand:** A dropdown menu.
- Öl-Daten:** A dropdown menu.

Below these sections is a blue button labeled 'Abschätzen!'. Underneath the button, the following calculated values are shown:

- Kontakttemperatur ≈ 111.4 °C
- Umfangsgeschwindigkeit ≈ 12.6 m/s
- Temperaturüberhöhung ≈ 31.4 °C
- Wärmeabfuhrwiderstand ≈ 7.98 m²K/W

At the bottom of the page, the logo for 'iMMA InsECT' is displayed, along with the copyright information: '© 2017 Institut für Maschinenelemente - Universität Stuttgart' and 'Beta-Version 17.04.03'.

Bild 3.1: Hauptseite von InsECT

3.3 Auswahl der Bestimmungsverfahren

Die Auswahl der Bestimmungsverfahren für die Kontakttemperatur bzw. die Reibleistung erfolgt auf der Hauptseite über die entsprechenden Schaltflächen, Bild 3.1

- Das **Bestimmungsverfahren für die Kontakttemperatur**
Hier stehen derzeit zur Auswahl:
 - ExACT-Gleichung (Beschreibung in Abschnitt 2.2.3.1, S. 11)
 - Empirisches Schwenk-Modell (Abschnitt 2.2.3.3, S. 17)
 - Faustformel mit Umfangsgeschwindigkeit (Abschnitt 2.1.1, S. 5)
- Das **Bestimmungsverfahren für die Reibleistung**
Ist für die Kontakttemperatur ein einstufiges Bestimmungsverfahren (siehe Abschnitt 2.1) ausgewählt, ist dieses Eingabefeld ausgegraut. Andernfalls, d.h. bei zweistufigen Bestimmungsverfahren (siehe Abschnitt 2.2), kann die Reibleistung auf folgende Arten bestimmt werden:
 - Gümbelkurven-Reibmodell (Abschnitt 2.2.2.2, S. 7)
 - Bekannte Reibleistung (Abschnitt 2.2.2.1, S. 7)
- Die **Iterationsanzahl**
Der Standardwert für die Iterationszahl bei iterativen Verfahren beträgt 100. Er kann im „Optionen“-Fenster (Menüleiste „Einstellungen“ → „Optionen“) geändert werden (Hintergrundinformationen in Abschnitt 2.2.1, S. 7).

3.4 Berechnung und Ergebnisausgabe

Die Berechnung der Kontakttemperatur erfolgt beim Drücken des Buttons „Abschätzen!“. Alternativ kann zur Berechnung auch die Enter-Taste gedrückt werden, wenn sich der Cursor in einem der Zahlen-Eingabefelder befindet.

Die Eingabe-Werte werden daraufhin an den InsECT-Webserver übermittelt, dort die Kontakttemperatur berechnet und diese dann wieder an den Browser übermittelt, der das Ergebnis nach einem Aktualisieren („Reload“) der Webseite anzeigt. Hilfe-Menü

4 FAQ

Das Kapitel „FAQ“ beinhaltet häufig gestellte Fragen und die zugehörigen Antworten. Bei Fragen, die nicht in diesem Kapitel behandelt werden, wenden Sie sich bitte direkt an die Entwickler von InsECT (siehe Abschnitt 1.7 auf S.4).

Wo kann ich sehen, welche Version von InsECT ich verwende?

Die Version wird ganz unten auf der Berechnungsseite (Reiter „Start“) angezeigt.

Kann ich InsECT auch für andere Wellendichtungen als Elastomer-RWDR (z.B. PTFE-Manschetten) einsetzen?

Ziel von InsECT ist es, die Temperaturüberhöhung bei Elastomer-RWDR möglichst präzise abzuschätzen. Die zugrundeliegenden Modellannahmen und die daraus abgeleiteten Gleichungen sind bislang nur für Elastomer-RWDR validiert und verifiziert, sind aber prinzipiell auch auf andere Bauformen von Wellendichtungen übertragbar.

Eine erste Machbarkeitsstudie zeigte, dass die in InsECT integrierte ExACT-Gleichung auch für PTFE-Manschetten angewendet werden kann. Für eine genaue Temperaturvorhersage müssen aber die Koeffizienten der Gümbelkurve (vgl. Abschnitt 2.2.2.2) und die der Nußelt-Korrelation (vgl. Abschnitt 2.2.3.1) aus Messwerten ermittelt werden.

Wo kann ich eigene Werte als Standardwerte speichern?

Eine Speicherfunktion für Werte ist für eine spätere Version vorgesehen aber für die Test-Versionen noch nicht umgesetzt. Bei Interesse kontaktieren Sie bitte die Entwickler von InsECT, siehe Abschnitt 1.7 (S. 4).

Ich finde InsECT nützlich und möchte die Weiterentwicklung unterstützen. Was kann ich tun?

Sie können die Weiterentwicklung von InsECT auf viele Arten unterstützen. Bitte setzen Sie sich mit den Entwicklern von InsECT (Abschnitt 1.7 auf S. 4) in Verbindung, um gemeinsam mit ihnen abzuklären, wie Sie bei der Weiterentwicklung von InsECT am besten helfen können.

Meine Frage ist hier nicht aufgeführt. Wie bekomme ich eine Antwort?

Bitte kontaktieren Sie direkt die Entwickler von InsECT, siehe Abschnitt 1.7 (S. 4).

5 Literaturverzeichnis

- [DEW1.7131] Deutsche Edelstahlwerke, Witten: Werkstoffdatenblatt 16MnCr5, 1.7131. Online: http://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/Baustahl/1.7131_1.7139_de.pdf. Abgerufen am 28.01.2016
- [DIN51563] DIN 51563: Prüfung von Mineralölen und verwandten Stoffen, Bestimmung des Viskosität-Temperatur-Verhaltens, Richtungskonstante m. April 2011
- [DIN53017] DIN 53017: Viskosimetrie. Bestimmung des Temperaturkoeffizienten der Viskosität von Flüssigkeiten. November 1993.
- [Eng11] Engelke, Tobias: Einfluss der Elastomer-Schmierstoff-Kombination auf das Betriebsverhalten von Radialwellendichtringen. Dissertation. Universität Hannover, 2011.
- [FeBH14] Feldmeth, Simon; Bauer, Frank; Haas, Werner: Untersuchung des Einflusses verschiedener Versuchskonfigurationen auf die Dichtspalttemperatur bei Radial-Wellendichtungen mittels CHT-Simulation. NAFEMS Online-Magazin 1/2014, S. 52-62, 29. Ausgabe. ISSN 2311-522X. Online: <http://www.nafems.de/downloads/magazin/nl29.pdf/>
- [FeBH15] Feldmeth, Simon; Bauer, Frank; Haas, Werner: Bestimmung von Kennzahlen für die Temperaturüberhöhung bei Radial-Wellendichtungen mittels CHT-Simulation. ANSYS Conference & 33th CAD-FEM Users' Meeting 2015, Bremen, 24.-26.06.2015. ISBN 3-937523-12-X
- [GAW2007] Gleich Aluminiumwerke, Kaltenkirchen: Aluminium Rundstangen. EN AW 2007. Technisches Datenblatt. Online: <http://gleich.de/de/produkte/aluminium-rundstangen/en-aw-2007?pdf>. Abgerufen am 28.01.2016
- [Jung12] Jung, Steffen: Beitrag zum Einfluss der Oberflächencharakteristik von Gegenauflflächen auf das tribologische System Radial-Wellendichtung; Dissertation. Universität Stuttgart, 2012.
- [MüHa15] Müller, Heinz Konrad; Haas, Werner. Dichtungstechnik. 9. Auflage 2015. Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart.
- [Schwe15] Schwenk, Christoph: Einflussfaktoren auf die Kontakttemperatur von Radialwellendichtungen - Parameterstudie und Abschätzprogramm. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, 2015. IMA2015-DT-018.
- [SFB570-C1] Löwisch, G.; Mayer, P: DFG-Sonderforschungsbereich 570, Teilprojekt C1. Stoffwertbestimmungen. Arbeitsbericht 01.01.2001 bis 15.04.2003. Online: <http://www.sfb570.uni-bremen.de/files/C1-Bericht.pdf>. Abgerufen am 23.02.2016

- [VDI13] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas. 11. Auflage. Berlin : Springer, 2013.

6 Anhang

6.1 Änderungsprotokoll (Changelog)

In Tabelle 6.1 sind alle wesentlichen Änderungen (Erweiterungen, Fehlerkorrekturen, ...) zwischen den Versionen aufgelistet. Nicht veröffentlichte Versionen sowie marginale Änderungen werden zur besseren Übersicht nicht aufgeführt.

Tabelle 6.1: Änderungsprotokoll

Version	Änderungen
17.03.27	<p><i>Erste Version auf bwCloud-Server</i></p> <p>Erweiterungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Englische Programmoberfläche <p>Fehlerkorrekturen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • (keine) <p>Sonstiges:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Umstieg auf Python 3.5 und Django 1.10
	•
	•

6.2 Dauerlaufprüfstände am IMA

Das IMA verfügt über mehrere modular aufgebaute Dauerlaufprüfstände zur Untersuchung von Dichtsystemen mit Elastomer-RWDR. Der Versuchsaufbau ist an den meisten Dauerlaufprüfständen sehr ähnlich, Bild 6.1. In CHT-Simulationen wird die Geometrie als rotationssymmetrisch angenommen. Der schematische Aufbau sowie die Hauptabmessungen können Bild 6.2 entnommen werden.

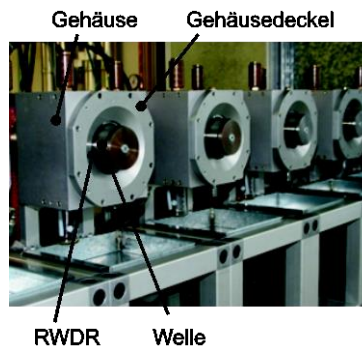


Bild 6.1: Dauerlaufprüfstand (4 Module sichtbar) [FeBH14]

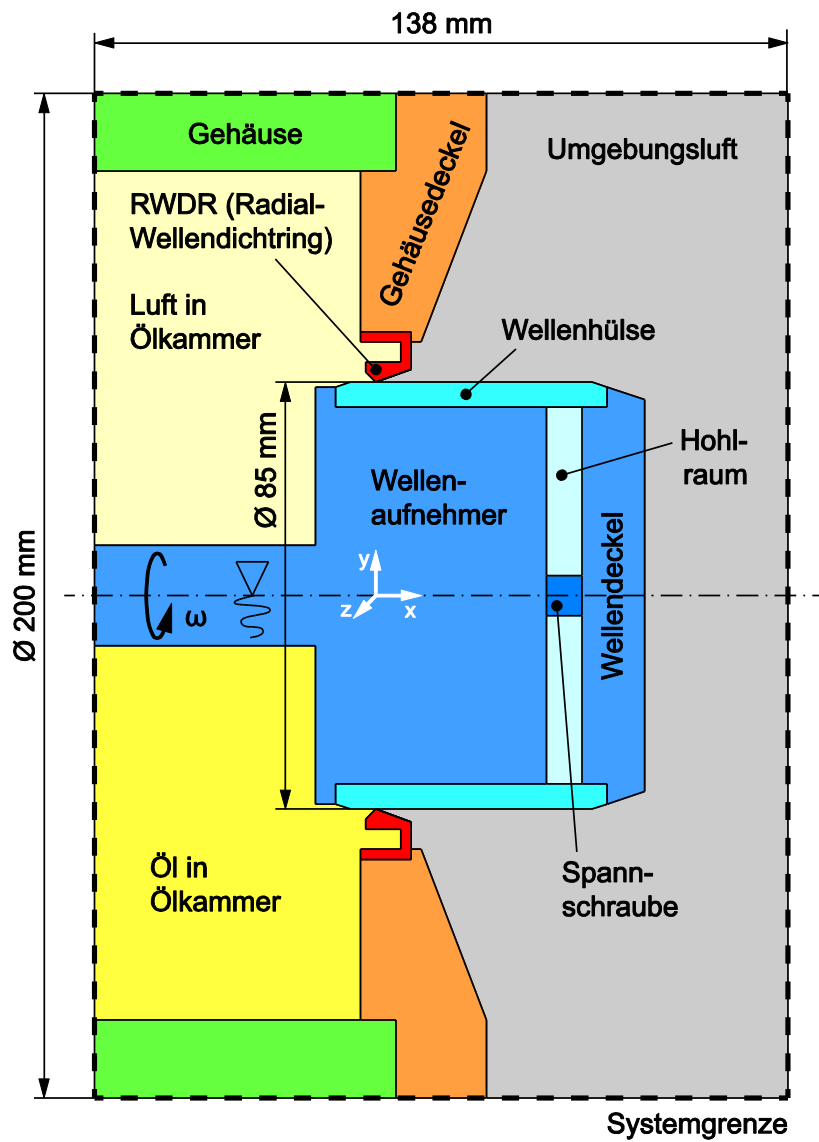


Bild 6.2: Schnitt durch das CHT-Simulationsmodell [FeBH14]

7 Platz für Notizen

