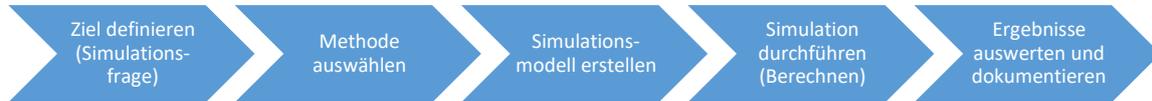


Die Durchführung einer Simulation lässt sich systematisch in fünf Abschnitte unterteilen:



1. Ziel definieren (Simulationsfrage)

Zu Beginn einer jeden Simulation definieren wir deren Ziel: Wir formulieren die Frage, die wir mit Hilfe der Simulation beantworten wollen. Diese „Simulationsfrage“ wird in aller Regel in einem gemeinsamen Gespräch erarbeitet, in dem Simulations-, Dichtungstechnik- und Anwendungsexperten mitwirken.



Mögliche „Simulationsfragen“ könnten beispielsweise lauten:

- Wie sieht die Pressungsverteilung zwischen Dichtkante und Welle/ Stange im drucklosen Betrieb oder bei einem bestimmten Druck aus? Ist damit ein Rückfördermechanismus möglich?
- Bei welcher Gestaltungsvariante des Dichtungsumfeldes tritt im Dichtkontakt die höchst/niedrigste Temperatur auf? Mit welchen Veränderungen kann die Temperatur gesenkt werden?
- Wie groß ist die Kraft, die benötigt wird, um ein Dichtungsprofil bei der Montage um einen bestimmten Betrag zu komprimieren?
- Wie schrumpft der Dichtungsquerschnitt, wenn die Dichtung auf eine bestimmte Temperatur abgekühlt wird? Wie verändert sich dabei die Vorspannung?
- Um wieviel größer/ kleiner ist die Fördermenge einer PTFE-Manschette mit Rückförderstrukturen Variante A im Vergleich zu Variante B?

2. Simulationmethode auswählen

Je nach Simulationsfrage wählen wir aus unserem vielfältig bestückten „Simulations-Werkzeugkoffer“ eine geeignete Simulationmethode sowie die zugehörige Simulationssoftware:

- Bei Strukturmechanischen Fragestellungen greifen wir auf die FEM (Finite Elemente Methode) und die Simulationssoftware MSC Marc/Mentat zurück. (siehe [IMA-Techsheet #103010](#)). Damit sind auch Verschleißsimulationen möglich ([IMA-TechSheet #103050](#))
- Bei reinen Strömungssimulationen („CFD“) und gekoppelte Wärme- und Strömungssimulation (CHT) verwenden wir ANSYS CFX. (siehe [IMA-Techsheet #103030](#))
- Bei Fragestellungen zu den Strömungsvorgängen im Dichtspalt kommt unser selbst entwickeltes Simulationsprogramm zur isoviskosen elasto-hydrodynamischen Schmierung (I-EHL) zum Einsatz. (siehe [IMA-Techsheet #103040](#))



Werden in einem Projekt mehrere Simulationsfragen definiert, die sich nicht mit einer einzelnen Simulationmethode beantworten lassen, führen wir mehrere Simulationen mit allen erforderlichen Simulationmethode/-werkzeugen durch. Soweit erforderlich, nutzen wir dabei die Ergebnisse einer Simulation als Eingangsinformationen für andere Simulationen und koppeln damit die verschiedenen Teilsimulationen.

3. Simulationsmodell erstellen

Bei der Modellierung erstellen wir das Simulationsmodell. Dies ist ein vereinfachtes Abbild des realen Systems und dient der effizienten Untersuchung der Simulationsfrage. Bei der Modellbildung werden nur Effekte berücksichtigt, die für die Beantwortung der Simulationsfrage relevant sind. Effekte, die so gut wie keinen Einfluss auf die Simulationsfrage haben, werden bei der Modellierung vernachlässigt.

Bei der Modellierung arbeiten wir stets nach dem Prinzip *„So einfach wie möglich, so kompliziert wie nötig.“*

Generell können natürlich nur Effekte, die bekannt und mathematisch beschreibbar sind, modelliert und mittels Simulation untersucht werden! So lässt sich die Frage „Wie lange ist eine statische Dichtstelle mit O-Ring unter Gamma-Strahlung dicht?“ nicht beantworten, ohne zuvor entsprechende Messungen durchgeführt und in ein mathematisches Modell überführt zu haben.

Die Modellierung erfolgt stets in engem Kontakt mit dem Auftraggeber. Treten bei der Modellierung Fragen auf, halten wir stets Rücksprache (mit dem Auftraggeber) und stimmen die Modellierung mit dem Anwendungsexperten ab. So stellen wir sicher, dass wir mit dem Simulationsmodell die Simulationsfrage präzise beantworten können.

Art der Simulation

Sind die Betriebsbedingungen des Dichtsystems konstant oder verändern sich diese nur langsam, reicht es häufig aus, in einer statischen Simulation den quasistationären Gleichgewichtszustand zu betrachten. Damit können wir beispielsweise das Anlageverhalten von Dichtringen nach der Montage untersuchen.

Ändern sich Betriebsbedingungen in kurzer Zeit stark, können wir mit transienten Simulationen den zeitlichen Verlauf dieser Vorgänge untersuchen. So können wir beispielsweise das Aufheizen eines Dichtsystems während eines Anfahrvorgangs analysieren.

Systemgrenzen und Randbedingungen

Wir legen die Systemgrenzen fest und definieren, welche Randbedingungen an diesen Grenzen wirken sollen. Ebenso bestimmen wir, welche Anfangsbedingungen zum Startzeitpunkt der Simulation gelten sollen.

Geometriebeschreibung und Vernetzung

Soweit möglich, nutzen wir Symmetrien bei der Modellerstellung aus und reduzieren damit den Aufwand für Modellerstellung und Berechnung auf das Mindestmaß. Neben 2-dimensionalen Simulationsmodellen bei ebenen und rotationssymmetrischen Fragestellungen verwenden wir – falls möglich – auch Teilmodelle mit periodischen Randbedingungen („Kuchenstücke“). Nur wenn sich keine Symmetrien ausnutzen lassen, erfolgt eine 3-dimensionale Modellierung.

Die Geometrie des Dichtelements und der umgebenden Komponenten können wir – je nach Verfügbarkeit – auf verschiedene Arten in die Simulationssoftware importieren:

- Import aus CAD-Datensatz (z.B. STEP-Format)
- Schliffbild mittels Harzeinguss des Dichtelements (siehe [IMA-Techsheet #104030](#))



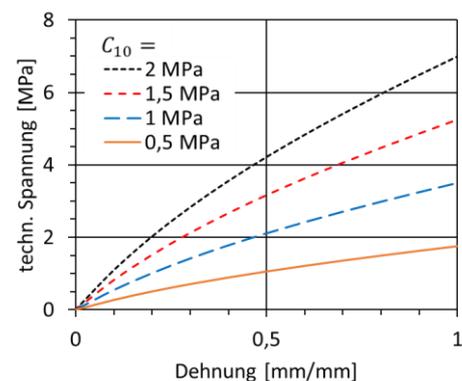
- Import aus zuvor durchgeführter Simulation (z.B. Geometrie eines Dichtelements nach Montage für anschließende gekoppelte Wärme- und Strömungssimulation)

Je nach Bedarf wird die Geometrie des Dichtelements und der umgebenden Komponenten vereinfacht. Dabei entfernen wir Einzelheiten (wie z.B. Spritzgrate am Dichtelement), die (fast) keinen Einfluss auf das Simulationsergebnis haben und deswegen den Aufwand für Modellierung und Berechnung unnötig erhöhen würden.

Bei der sogenannten „Diskretisierung“ wird die Geometrie in eine Vielzahl kleiner Elemente unterteilt, die das sogenannte „Berechnungsnetz“ bilden. Für jedes Element werden in der späteren Berechnung die zugrundeliegenden physikalischen Gleichungen näherungsweise gelöst. Bei der Vernetzung achten wir darauf, dass wir insbesondere an „wichtigen“ Bereichen (wie z.B. an Dichtkanten) ein feines und qualitativ hochwertiges Berechnungsnetz erzeugen. In einer sogenannten Netzverfeinerungsstudie verfeinern wir das Berechnungsnetz so lange, bis sich das Simulationsergebnis nicht mehr verändert und wir sicher sind, dass dieses netzunabhängig ist.

Materialmodellierung

Als Dichtungswerkstoffe kommen häufig Elastomere oder PTFE-Compounds zum Einsatz, die sich in ihrem mechanischen Verhalten deutlich von anderen Werkstoffgruppen wie z.B. Metalllegierungen unterscheiden. Elastomere zeigen ein stark ausgeprägtes nichtlineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten. Darüber hinaus ist das Spannungs-Dehnungsverhalten aufgrund der sogenannten Viskoelastizität stark zeit- und temperaturabhängig. Bei PTFE-Compounds kommen zusätzlich plastische Effekte („Fließen“) hinzu.



Um das Werkstoffverhalten von Elastomeren treffend abzubilden, verwenden wir hyperelastische Materialmodelle (z.B. Neo-Hooke- oder Mooney-Rivlin-Modell). Die Viskoelastizität bilden wir mittels einer Prony-Reihe und einer Temperaturverschiebung mit der sogenannten WLF-Gleichung ab. Bei PTFE-Compounds verwenden wir elastisch-plastische Materialmodelle, die die sogenannte Gleichgewichtsfleißkurve abbilden.

Für Dichtungswerkstoffe können wir die benötigten Materialparameter auf unterschiedliche Weisen ermitteln (siehe [IMA-TechSheet #103020](#)):

- Überschlägige Berechnung aus Shore A-Härte (schnellste Methode)
- Zugversuch an Universalprüfmaschine (siehe [IMA-TechSheet #102120](#))
- Pure-Shear-Versuch an Universalprüfmaschine
- Aufblasversuch für biaxialen Spannungszustand (siehe [IMA-TechSheet #102130](#))
- DMA (Dynamisch Mechanische Analyse)

Ist das Temperatur-Viskositätsverhalten von Ölen für eine Strömungssimulation erforderlich, bestimmen wir dieses an unserem Rheometer ([IMA-TechSheet #102170](#)).

Betriebsbedingungen

Häufig sollen mehrere Betriebspunkte mit unterschiedlichen Betriebsbedingungen mittels Simulation analysiert und verglichen werden. Hierzu parametrisieren wir das Simulationsmodell. Damit können wir einen oder mehrere Parameter in einer Parameterstudie variieren. Damit lassen sich beispielsweise kritische Betriebspunkte ermitteln (siehe [IMA-TechSheet #103060](#)).

4. Simulation durchführen (Berechnen)

Für die Berechnung der Simulationen am IMA nutzen wir moderne, leistungsstarke Workstations. Für sehr rechenaufwändige Simulationen verfügen wir über einen Zugang zu den Clustern des Höchstleistungsrechenzentrums Stuttgart (HLRS, www.hlrs.de), das an die Universität Stuttgart angegliedert ist.



Bildquelle: hlrs.de

Wir verfügen über eine Vielzahl an dauerhaften Lizenzen etablierter Simulationssoftware-Pakete für die Lehre und öffentlich geförderte Forschung. Bei Bedarf können wir kurzfristig auf Mietbasis Lizenzen für kommerzielle Zwecke beziehen und damit kundenspezifische Projekte mit Industrieunternehmen bearbeiten.

5. Ergebnisse auswerten und dokumentieren

Während der Auswertung hinterfragen wir alle Simulationsergebnisse kritisch und prüfen diese fortlaufend auf Plausibilität. Die Simulationsergebnisse bereiten wir so auf, dass diese auch für „Simulationslaien“ verständlich sind und die eingangs definierte Fragestellung klar beantworten. Zur effizienten Ergebnisauswertung greifen wir auf selbst programmierte Auswerterroutinen zurück, die automatisch dichtungstechnische Kenngrößen ermitteln.

Neben der reinen Ergebnisdarstellung gehört stets auch eine dichtungstechnische Bewertung, die durch daraus resultierende Handlungsempfehlung ergänzt wird. Die Ergebnisvorstellung und –dokumentation erfolgt in Absprache mit dem Auftraggeber. Sie kann beispielsweise als übersichtlicher, stichwortartiger Kurzbericht in Präsentationsform oder als ausführlicher schriftlicher Bericht mit umfassender Darstellung des gesamten Simulationsprozesses erfolgen. Ergebnispräsentationen erfolgen per Web-Meeting oder bei einem persönlichen Besuch (beim Auftraggeber oder am IMA).

