

Einfach erklärt...

Das müssen Sie bei der

Berechnung von Gummi

unbedingt wissen



Herausgeber

© 2018 Ingenieurbüro Merkle & Partner | Stefan Merkle Holding GmbH

Stefan Merkle Holding GmbH · Friedrichstraße 1 · 89518 Heidenheim · Deutschland
Tel.: +49 (0)7321 9343-0 · Fax: +49 (0)7321 9343-20 · E-Mail: info@merkle-partner.de · Web: www.merkle-partner.de

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ist ohne Zustimmung des Herausgebers unzulässig. Dies gilt insbesondere für die elektronische oder sonstige Vervielfältigung, Übersetzung, Verbreitung und öffentliche Zugänglichmachung.

Inhalt

1	EINLEITUNG	2
2	WAS IST GUMMI?	3
3	WO WIRD GUMMI EINGESETZT?	3
4	WARUM SOLLTE MAN DAS VERHALTEN VON GUMMI KENNEN?	3
5	WIE VERHÄLT SICH GUMMI?	4
6	WAS IST DIE GLASTEMPERATUR?	5
7	WAS VERSTEHT MAN UNTER DIFFUSION?	5
8	WAS VERSTEHT MAN UNTER QUELLUNG?	6
9	WAS HAT GUMMI MIT DÄMPFUNG ZU TUN?	6
10	DAS MATERIALVERHALTEN VON GUMMI	7
	10.1 HYPERELASTIZITÄT	7
	10.2 VISKOELASTIZITÄT	7
11	REIBUNG UND GUMMI	7
12	ALTERUNG UND GUMMI	8
13	HOCHDYNAMISCHE BELASTUNGEN UND SCHOCK	8
14	WORAN ES BISHER HAPERT	8
15	ZUSAMMENFASSUNG	9
16	IHR VORTEIL	9

1 Einleitung

Gummi ist für die numerische Berechnung mit Hilfe der numerischen Simulation ein Teufelszeug. Es ist nicht damit getan, anhand eines Zugversuches ein Materialmodell zu fitten, sondern man muss wissen, was bei Gummi alles passieren kann, um verwertbare Aussagen treffen zu können.



Die meisten Berechnungsingenieure haben meistens keine Zeit, sich intensiv mit dem Werkstoff Gummi auseinander zu setzen und wenden die in den Softwarepaketen vorhandenen Werkstoffgesetze, vorsichtig gesagt, etwas blauäugig an.

Softwareentwicklern fehlt der äußere Zwang, sich intensiver mit dem Thema zu beschäftigen, da es nur einen kleinen Kreis potentieller Kunden gibt, die sich intensiv mit diesem Thema auseinandersetzen. Will man hier bessere Ergebnisse erzielen, ist man auf die Programmierung eigener Subroutinen angewiesen.

Messlabore messen Spannungs-Dehnungs-Kurven, Reibfaktoren und Temperatureinflüsse ohne ein tieferes Verständnis, was hier sinnvoll ist und was sich ggf. durch theoretische Ansätze von alleine ergibt.

Kurz gesagt, wieder einmal entstehen häufig nur bunte Bilder, deren Aussagekraft äußerst zweifelhaft ist.

Daraus können gravierende Schäden entstehen, wenn z.B. eine Dichtung einer Pumpe im Auto versagt und ausgetauscht werden muss.

Dem wollen wir mit dem vorliegenden E-Book entgegenwirken, um die Welt der Gummiberechnung etwas einfacher und klarer zu machen.

Was qualifiziert uns?

Ich, Stefan Merkle, beschäftige mich seit über 30 Jahren mit dem Thema Simulation, um kundenspezifische Aufgabenstellungen mit Hilfe der numerischen Simulation zu lösen. Manfred Achenbach hat sein berufliches Leben der Berechnung von Elastomeren gewidmet und verfügt über mehr als 35 Jahre Erfahrung in diesem Bereich.

Heidenheim, 07.12.2018

Stefan Merkle

Dr. Manfred Achenbach

2 Was ist Gummi?

In der Technik werden als Gummi (der, Mehrzahl Gummis) die Vulkanisate von Natur- und Synthetikgummen bezeichnet. Durch Vulkanisation entstehen elastische und relativ strapazierfähige (Weich-)Gummis, die Elastomere. Sie werden für Autoreifen, O-Ringe, Dichtelemente, Gummistiefel oder Gummihandschuhe etc. eingesetzt.

Chemisch gesehen, sind Kautschuke Ketten von Kohlenwasserstoffen oder Fluorkohlenwasserstoffen, die sich durch die Vulkanisierung unter Druck und Temperatur untereinander vernetzen.

3 Wo wird Gummi eingesetzt?

In der Technik wird Gummi häufig dafür eingesetzt, um ruhende von ruhenden oder bewegten Maschinenbauteilen abzudichten und Medien (z.B. Öl und Wasser) voneinander dauerhaft zu trennen.

Funktioniert die Dichtung nicht oder nicht mehr, kommt es zu Leckagen.

4 Warum sollte man das Verhalten von Gummi kennen?

Das wohl bekannteste Versagen einer Gummidichtung geschah am 28. Januar 1986. Es war die 25. Space-Shuttle-Mission sowie der zehnte und letzte Flug der Raumfähre Challenger.

73 Sekunden nach dem Start zerbrach die Raumfähre, in Folge dessen alle sieben Besatzungsmitglieder ums Leben kamen. Es handelte sich zu diesem Zeitpunkt um das schwerste Unglück in der US-Raumfahrtgeschichte.

Was war passiert?

Der Start hatte sich um mehrere Tage immer wieder verzögert. Die Außentemperatur lag nahe des Gefrierpunktes und war damit für Florida ungewöhnlich kalt.

Die Dichtung der Feststoffbooster war von der NASA nicht zertifiziert worden. Als Druck auf die Booster kam, war die Dichtung zu kalt und spröde, es kam zu einem Durchschlagen der Flammen und zur Katastrophe, welche die Weltraumfahrt um Jahre zurückwarf.

Hätten die Ingenieure damals den Werkstoff besser verstanden, hätte diese Katastrophe vermieden werden können.



Die eingesetzte Dichtschnur wurde von der Parker Hannifin GmbH hergestellt, aber niemals für diese Zwecke konzipiert und freigegeben.

Dr. Achenbach, der zur damaligen Zeit für Parker Hannifin tätig war, hat genau dieses Verhalten ausführlich untersucht und betrachtet.

5 Wie verhält sich Gummi?

Dehnt man Gummi langsam und immer schneller, wird er warm. Kommt er mit bestimmten Flüssigkeiten, z.B. Wasser oder Öl in Kontakt, quillt er auf.

Mischt man Additive bei, ändert sich sein Verhalten grundlegend.

Weichmacher können sich mit der Zeit verflüchtigen und der Gummi verhält sich dann ganz anders.

Umgebende bzw. abzudichtende Medien oder Strahlung führen dazu, dass Gummi altert, in der deformierten Form neue Vernetzungen bildet, dadurch entweder weicher oder auch härter und spröder wird und ggf. nicht mehr richtig abdichtet. Dies hängt davon ab, welche chemischen Prozesse dominieren.

Bei Temperaturänderungen ändert der Gummi ebenfalls sein Verhalten.

Presst man Gummi zusammen, braucht er Raum, um sich auszudehnen, bzw. fährt auf Block, wenn er nicht mehr ausweichen kann. Die Kräfte steigen dann sehr stark an. Sein Volumen bleibt nahezu konstant.

Belastet man ihn schnell, wird er steifer.

Reibung mit Gummi gehorcht ganz eigenen Gesetzen, die Annahme eines festen Reibfaktors ist faktisch falsch. Bei langsamen und sehr schnellen Geschwindigkeiten sind die Reibkräfte geringer und haben dazwischen ein Maximum.

Wird Gummi zu kalt, verliert er seine elastischen Eigenschaften und wird spröde.

Gummi verhält sich bei kurzzeitigen Belastungen und hohen Temperatur ähnlich wie bei langzeitigen Belastungen und niedrigeren Temperaturen. Diese Eigenschaft kann dazu verwendet werden, das Langzeitverhalten bei höheren Temperaturen in kurzen Versuchen zu bestimmen. Man spricht hier von Zeitraffversuchen durch eine Zeit-Temperaturverschiebung.

Die gute Nachricht ist, dass sich alle die beschriebenen Effekte berechnen lassen, wenn man weiß was man tut.

Die schlechte Nachricht? Man muss schon wissen, was man tut und wie man es tut. Im Zeitalter der Knopfdrucklösungen und intuitiven Softwarebedienung ist dies eine echte Herausforderung.

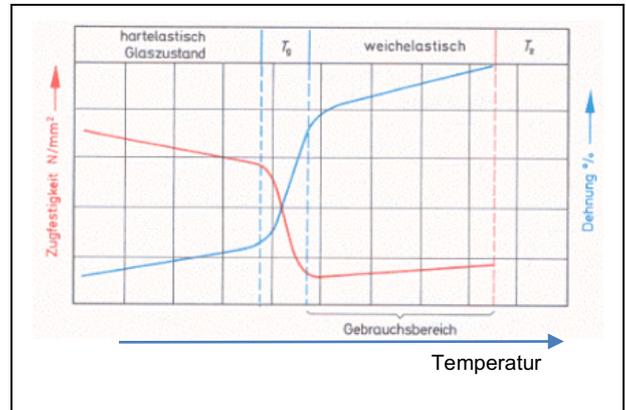
Man kann Autos fahren, ohne zu wissen, wie Motoren funktionieren. Aber man kann einen Motor nicht bauen, ohne das Verständnis darüber, wie er funktioniert.

6 Was ist die Glastemperatur?

Die Glastemperatur, oft auch als Glasübergangstemperatur bezeichnet, ist die Temperatur des so genannten Glasübergangs, bei dem ein anorganisches oder organisches Glas bei Temperaturerhöhung vom Glaszustand in einen werkstoffabhängig flüssigen bis gummiartigen Zustand übergeht.

Sie ist eine Werkstoffeigenschaft.

Gummi verhält sich also erst oberhalb der Glastemperatur wie Gummi, darunter ist er spröde und verhält sich eher wie Glas.



Die Glastemperatur erhöht sich bei schnellen, dynamischen Verformungen.

Gummi darf niemals unterhalb seiner Glastemperatur eingesetzt werden da er hier alle seine relevanten Eigenschaften verliert!

Wird Gummi dynamisch eingesetzt, z.B. bei einer schockartigen Beanspruchung, steigt die erlaubte Mindesttemperatur an!

7 Was versteht man unter Diffusion?

Wird eine Dichtung von Medien oder Gasen umgeben, dringen die Atome mit der Zeit in den Gummi ein.

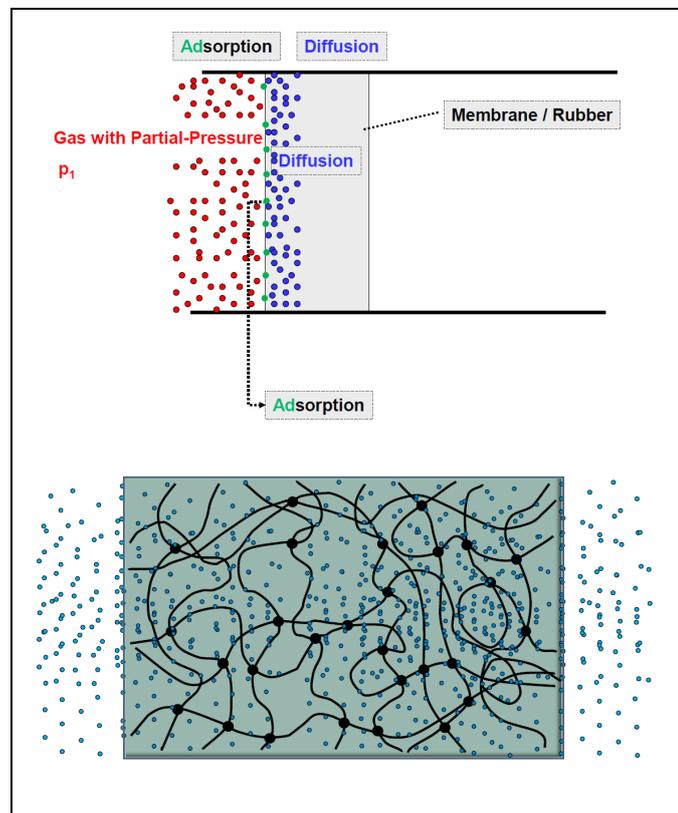
Der Vorgang dauert solange, bis die Sättigungskonzentration erreicht ist.

Da jetzt mehr Atome im gleichen Körper vorhanden sind, ändern sich zum einen die Eigenschaften, zum anderen das Volumen, die Dichtung quillt auf.

Die Diffusionskonstante, die angibt, wie schnell die Atome eindringen, ist eine Funktion der Temperatur und der beteiligten Medien und kann in einem sogenannten Diffusionsversuch bestimmt werden.

Die Löslichkeitskonstante gibt an, wieviel Atome maximal aufgenommen werden können.

Wichtig ist, dass die Dichtung aufgrund von Diffusionseffekten ihr Verhalten ändert.



8 Was versteht man unter Quellung?

Quellung ist also nichts anderes, als das Eindringen von fremden Atomen in Gummi.

Damit verbunden ist eine zeitliche Änderung des Volumens und der Dichtungsform.

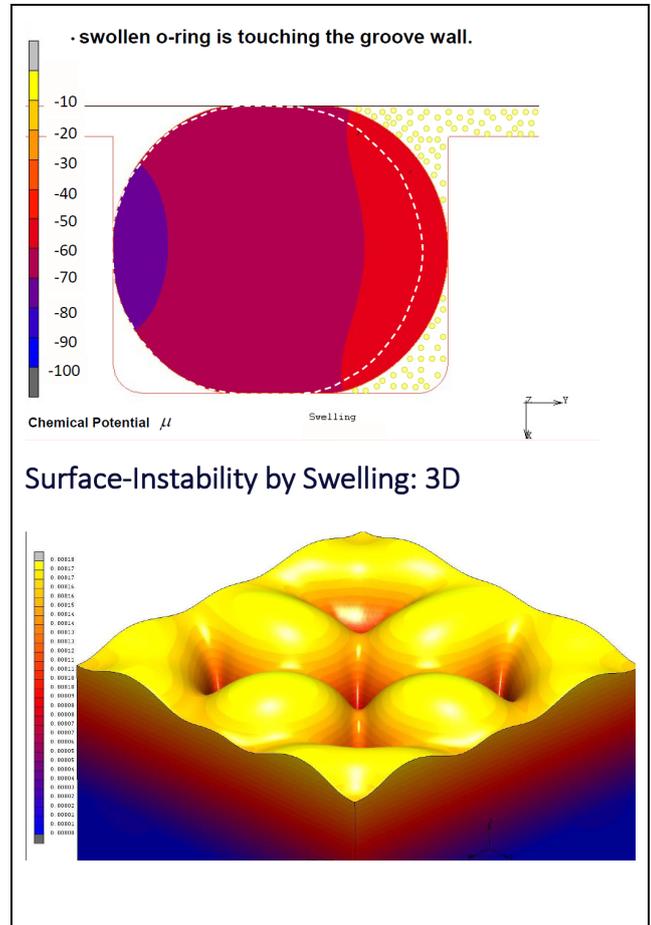
Zusätzlich ändert sich das Materialverhalten der Dichtung.

Durch die Volumenänderung beim Quellen kann sich zudem die Oberfläche durch Instabilitäten ändern, wie die nebenstehende Abbildung zeigt.

Beispiel:

Eine Dichtung, die Öl von Wasser in einem Motor trennt.

Die Diffusion führt also zu einer zeitlichen Veränderung der Dichtung und ihres Verhaltens. Es gibt verschiedenste Anwendungsfälle, wo eine Vernachlässigung dieser Effekte zu falschen Aussagen führt.



9 Was hat Gummi mit Dämpfung zu tun?

Gummi wird oft dazu eingesetzt, Schwingungen zu dämpfen.

Oftmals sind diese Dämpferelemente Verbundbauteile aus Metall und Gummi. Die Verbindung des Gummis mit dem Metall wird über Vulkanisieren des Gummis auf eine entsprechend aufbereitete Metalloberfläche erreicht.

Die Dämpferelemente werden beim Schwingen warm, womit sich wiederum das Werkstoffverhalten ändert.

Die Wärmeentstehung kann bei einer entsprechenden Beschreibung des Gummimodells berechnet werden. Beinhaltet das Materialgesetz noch den Einfluss der Materialeigenschaften als Funktion der Temperatur, kann die Aufgabe geschlossen berechnet werden.

10 Das Materialverhalten von Gummi

Das Verhalten von Gummi oberhalb der Glastemperatur weist zwei wesentliche Effekte auf.

10.1 Hyperelastizität

Hyperelastizität beschreibt zunächst ein nichtlinear-elastisches Materialverhalten für sehr große Dehnungen. Diese Materialmodelle lassen dabei auch Inkompressibilität zu. Dies entspricht einer Querkontraktionszahl von 0,5. Gummi ist ein inkompressibles Material. Herkömmliche Materialgesetze, wie man sie aus dem FEM-Bereich für Stahl und Aluminium kennt, funktionieren hier nicht mehr. Hier gibt es numerisch verschiedene Ansätze, z.B. Mooney Rivlin, Ogden, Neo-Hook und andere, die ein solches Materialverhalten beschreiben können.

Diese Materialgesetze basieren dabei auf der Formänderungsenergie.

Als Ergänzung kann gesagt werden, dass sich dieses Verhalten aus der Freien Energie des Werkstoffs ableitet. Die Freie Energie besteht aus der Inneren Energie und der Entropie. Bei Gummi spielt die Innere Energie eine untergeordnete Rolle. Daher spricht man auch in diesem Zusammenhang von Entropieelastizität. Dies sind grundlegender Begriff aus der Thermodynamik.

10.2 Viskoelastizität

Viskoelastisches Verhalten bedeutet, dass ein Werkstoff mit der Zeit auf eine Belastung mit bleibenden Deformationen reagiert, wie ein hydraulischer Stoßdämpfer beim Auto, der verschoben wird.

Dieses Verhalten lässt sich aus der Entropie ableiten, ebenfalls einem Begriff aus der Thermodynamik, der irreversible, also nicht rückgängig machende Effekte beschreibt.

Die innere Reibung, also die Erwärmung z.B. bei der dynamischen Beanspruchung von Gummi ergibt sich ebenfalls aus der Entropie.

11 Reibung und Gummi

Werden bewegte Teile von ruhenden Teilen durch Dichtungselemente abgedichtet, spielt Reibung eine wesentliche Rolle.

Reibung bei Gummi kann nicht mit dem Coulombschen Reibungsgesetz abgebildet werden, da dieses eine Unabhängigkeit von der Normalkraft annimmt, die bei Gummi nicht gegeben ist.

Dr. Achenbach hat hier ein spezielles Reibgesetz entwickelt, das sogenannte Achenbachmodell, welches Merkle & Partner einsetzen kann.

Hier wird der Einfluss der inneren Reibung auf die äußere Reibung berücksichtigt und im Modell integriert.

Die innere Reibung entspricht dem viskoelastischen Verhalten.

12 Alterung und Gummi

Im Verlauf der Zeit altern Werkstoffe und Gebrauchsgegenstände aus Gummi. Ursächlich dafür ist die Einwirkung von Sauerstoff, Wärme, Ozon, Licht oder auch mechanische Beanspruchung. Um Alterungsvorgänge zu verlangsamen, werden Alterungsschutzmittel zugesetzt.

Effekte, die an der Oberfläche des Gummis wirken wie z.B. Strahlung, führen zu kleinen Rissen. Dies ist dann ein Thema der Bruchmechanik.

Für die Beschreibung des Langzeitverhaltens einer Dichtung sind die bisher beschriebenen Effekte aber ausreichend.

13 Hochdynamische Belastungen und Schock

Wie bereits ausgeführt, verhält sich Gummi bei sehr schnellen Belastungen wesentlich steifer und auch die Glastemperatur steigt an.

Diese Effekte können wir in unser Berechnungsmodell ebenfalls integrieren, um das Verhalten auch bei hochdynamischen Effekten beschreiben zu können.

14 Woran es bisher hapert

Versuch und Messtechnik, Theoretiker und Berechnungsingenieure reden zu wenig miteinander. Jeder kennt nur sein Fachgebiet und seinen Fokus.

Der Versuch fährt Messungen z.B. unter unterschiedlichen Temperaturen, der theoretische Ansatz würde es aber erlauben, mit Gesetzen aus der Thermodynamik, der Chemie und der Physik mit wesentlich weniger Messkurven auszukommen. Der Theoretiker verliert sich in nebensächlichen Effekten, die für die Lösung nicht zwingend relevant sind und kann die erforderliche Zeitschiene nicht halten. Der Berechnungsingenieur unterschätzt die Komplexität, kennt die Zusammenhänge nicht ausreichend und vertraut der Software, die von Softwareingenieuren aus dem Gesichtspunkt entwickelt werden, möglichst einfach bedienbar und numerisch stabil zu sein.

Bringt man alle Disziplinen, wie in unserem Fall, unter einen Hut, kann man schnellere, bessere und genauere Prognosen über das Verhalten auch so hochkomplexer Werkstoffe wie Gummi machen.

15 Zusammenfassung

Die Berechnung von Gummi hinsichtlich

- Kurzzeitverhalten
- Langzeitverhalten
- Dynamischem Verhalten inkl. Reibung
- Quellen
- Alterung
- Erwärmung bei dynamischer Beanspruchung
- Dämpfungsverhalten

etc. lassen sich mit einem geschlossenen Lösungsansatz berechnen, wobei die richtigen Versuche gefahren werden, um den Werkstoff zu charakterisieren.

Aktuell erfolgt die Berechnung über entsprechende eigenprogrammierten Userrountinen in kommerziellen Softwarepaketen wie Marc oder Abaqus.

Mit all dem müssen Sie sich jedoch nicht auseinandersetzen. Sie schildern uns Ihre Aufgabenstellung und erhalten von uns eine maßgeschneiderte Lösung über Ihre Aufgabe.

16 Ihr Vorteil

Durch die Zusammenarbeit von Merkle & Partner, Dr. Achenbach und entsprechenden Prüfeinrichtungen stellen wir sicher, dass die Anforderungen von Ihnen hinsichtlich des theoretischen Hintergrundes, der Messtechnik und der zügigen und schnellen Abwicklung von Projekten optimal erfüllt werden können.

Wir verfügen über eine geschlossene Lösung bei der Berechnung von Gummi, welche den jeweils gestellten Anforderungen genügt. Dem alten Spruch der Simulationspápste,

„make it simple, but not simpler“

Der ursprünglich auf ein Zitat von Albert Einstein zurückgeht, tragen wir mit unserer Vorgehensweise Rechnung.

Haben Sie Schadensfälle, für die Sie keine Erklärung haben?

Sind Sie sich unsicher, ob die Dichtung, die sie heute einsetzen, auch morgen noch dicht ist?

Schreiben Sie mir eine kurze E-Mail an s.merkle@merkle-partner.de

Ich rufe Sie dann schnellstmöglich zurück, um die weitere Vorgehensweise zu besprechen.

Wir freuen uns auf Sie.

Ihr Stefan Merkle

Sie haben Fragen?

+49 (0)7321 9343-0

info@merkle-partner.de

Herausgeber

Ingenieurbüro Merkle & Partner

Stefan Merkle Holding GmbH
Friedrichstraße 1
89518 Heidenheim
Deutschland

Tel.: +49 (0)7321 9343-0
E-Mail: info@merkle-partner.de
Web: www.merkle-partner.de