

## 1. Grundlegendes

Wirken mechanische Kräfte auf einen Körper, so treten in diesem Körper Materialspannungen auf. Es kommt zu einer ideal elastischen, rein viskosen oder viskoelastischen Deformation des Körpers. Die meisten Materialien besitzen viskoelastische Eigenschaften und damit sowohl eine elastische als auch viskose Komponente. Beispiele für viskoelastische Materialien sind Cremes, Salben, Lotionen, Suspensionen, Suppositorien und kolloidale Lösungen.

Ein typisches Beispiel aus dem täglichen Leben sind Kräuterdressings (s. Foto). Die suspendierten Kräuter im gelartigen klaren Suspensionsmedium sedimentieren nicht, sie bleiben in der Schwebe (der Verkäufer geht also nicht hin und schüttelt sie alle halbe Stunde auf). Man kann es sich vereinfacht so vorstellen, daß wenn das Teilchen versucht zu sedimentieren, so federt das Dispersionsmedium es elastisch zurück. Derartige Systeme sind hoch interessant um pharmazeutische Suspensionen zu generieren, die nicht mehr sedimentieren.

Viskoelastische Eigenschaften spielen auch bei der Verarbeitung vieler Materialien in der Pharmazie eine Rolle, z.B. das Ausstreichen von Polymer-Massen zu Filmen für transdermale Pflaster. Ist die Masse zu elastisch, so wird die Oberfläche rauh, ist sie primär viskos, so wird sie glatt.



## 2. Modellvorstellungen für ideal elastische, rein viskose und viskoelastische Materialien

### 2.1. Modellvorstellung für ideal elastische Materialien

Als Modell für ideal elastische Materialien dient eine Metallfeder (Abb. 1). Wird eine Feder mit einer gewissen Zugkraft ausgelenkt, resultiert ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen der Deformation (Auslenkung) der Feder und der Zugkraft. Wird die Zugkraft abgesetzt kehrt die Feder wieder in ihre ursprüngliche Position zurück, d.h. die in das System hineingesteckt Energie wird vollständig wieder abgegeben [1].

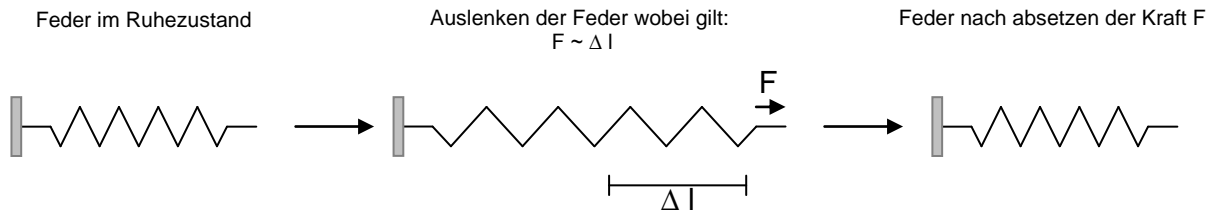


Abb. 1: Verhalten einer Feder unter Krafteinwirkung als Modell für eine ideal elastische Substanz.

### 2.2. Modellvorstellung für rein viskose Materialien

Das Verhalten von rein viskosen Materialien kann mit Hilfe eines Dämpfers erklärt werden (Abb. 2). Wird ein Dämpfer mit einer gewissen Zugkraft ausgelenkt, resultiert ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen der Verformungsgeschwindigkeit und der Zugkraft. Wird die Zugkraft abgesetzt bleibt der Dämpfer in der Endposition und kehrt nicht in die Ausgangsposition zurück, d.h. die in das System hineingesteckte Energie wurde vollständig in Wärmeenergie umgewandelt [1].

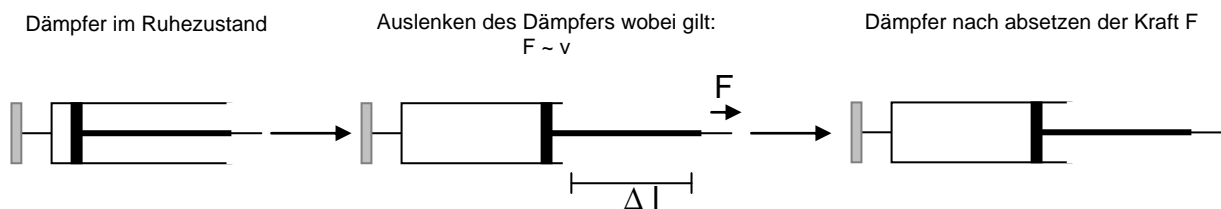


Abb. 2: Verhalten eines Dämpfers unter Krafteinwirkung als Modell für eine rein viskose Substanz.

### 2.3. Modellvorstellungen für viskoelastische Materialien

Da viskoelastische Materialien sowohl elastische als auch viskose Eigenschaften besitzen, wird zur Beschreibung ihres Verhaltens eine Kombination aus einer Feder (elastisches Verhalten) und einem Dämpfer (viskoses Verhalten) heran gezogen. Werden die Feder und der Dämpfer in Reihe geschaltet spricht man vom Maxwell Modell (Abb.3). Wird eine konstante Zugkraft am Maxwell Modell angelegt, kommt es zur Auslenkung der elastischen Feder sowie des Dämpfers. Die Auslenkung der Feder und des Dämpfers verhalten sich additiv und sind direkt proportional zur Zeit. Wird die Zugkraft abgesetzt geht die Feder sofort in ihre Ausgangsposition zurück während der Dämpfer ausgelenkt bleibt [2, 3].

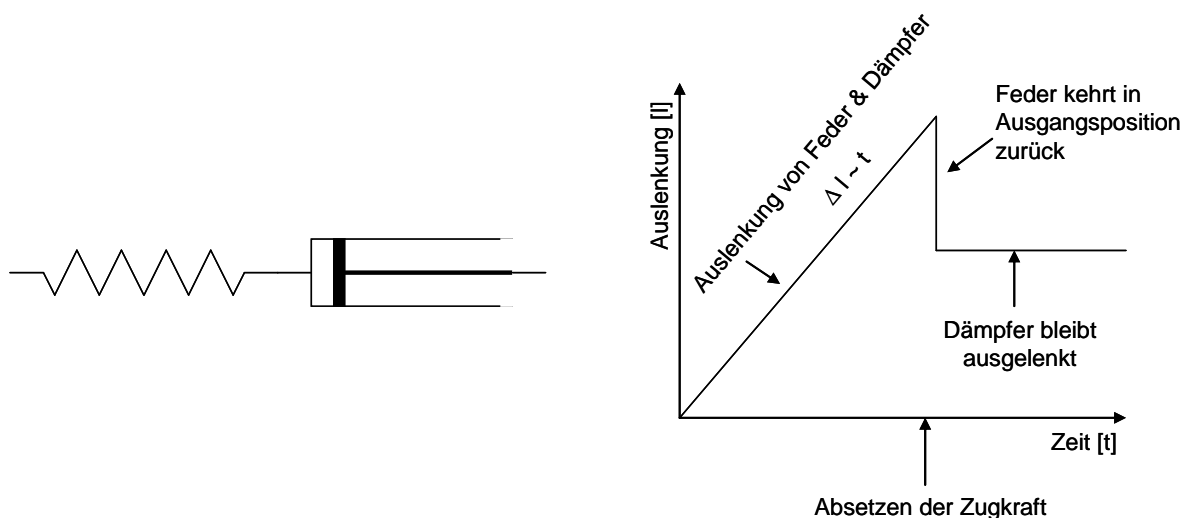


Abb. 3: Aufbau des Maxwell Modells (links) und die Auslenkung des Systems als Funktion der Zeit (rechts).

Im Voigt-Kelvin Modell werden die Feder und der Dämpfer parallel geschaltet (Abb. 4). Wird eine konstante Zugkraft an diesem Modell angelegt, kann die Feder nur in dem Maße ausgelenkt werden wie auch der Dämpfer ausgelenkt wird. Wird die Zugkraft abgesetzt geht das System langsam in den Ausgangszustand zurück. Die Feder kann hierbei nur mit der Geschwindigkeit zurück in ihre Ausgangsposition gehen mit der der Dämpfer in seine Ausgangsposition zurückgezogen wird [2, 3].

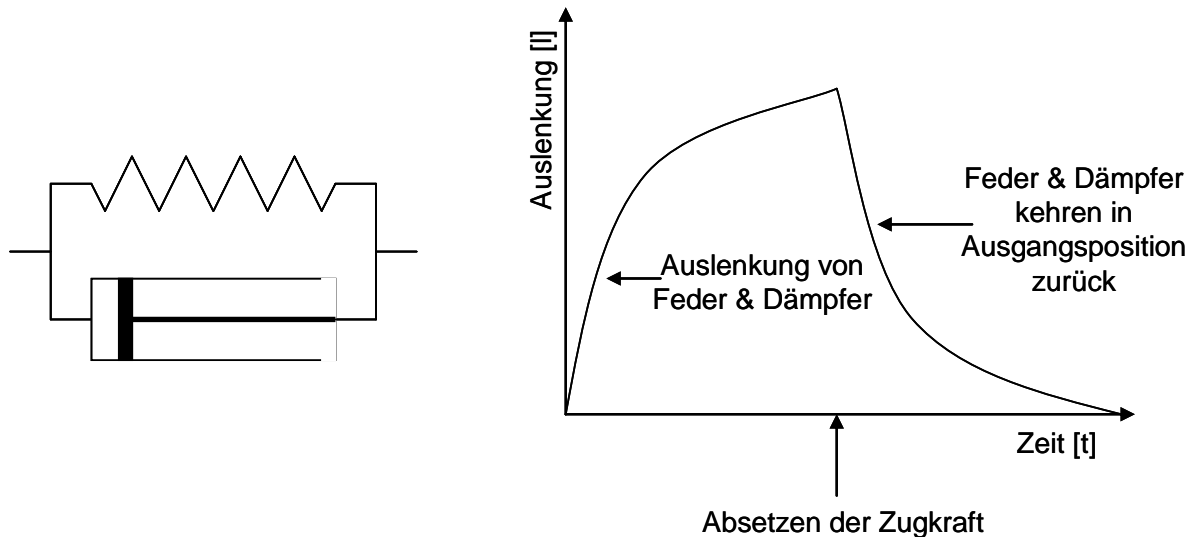


Abb. 3: Aufbau des Voigt-Kelvin Modells (links) und die Auslenkung des Systems als Funktion der Zeit (rechts).

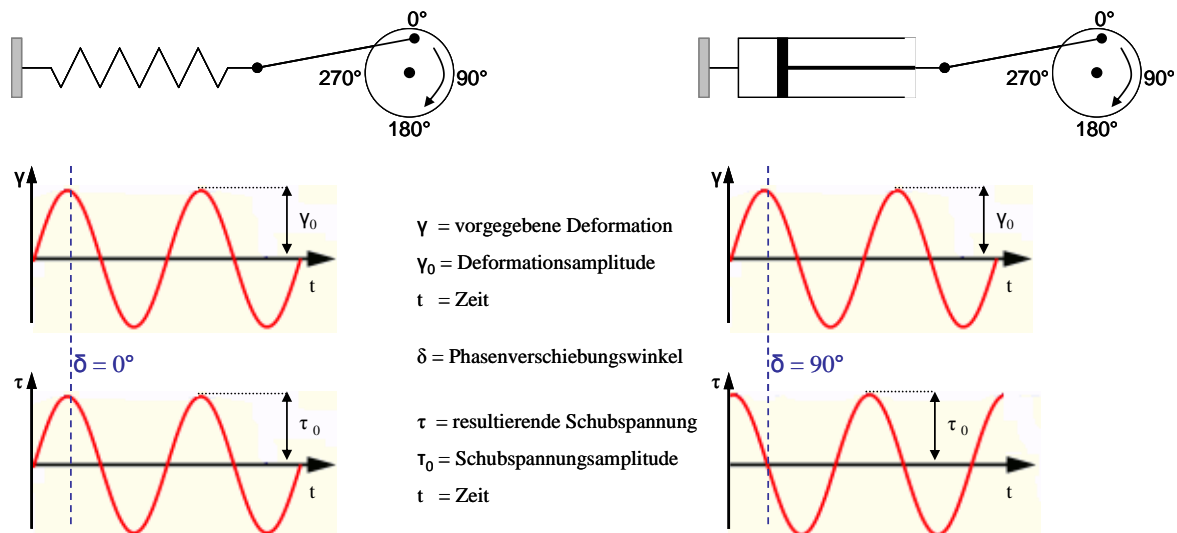
Mehrere Maxwell und/oder Voigt-Kelvin Elemente können in Serie und/oder parallel geschaltet werden um komplexes viskoelastisches Verhalten zu erklären [4].

### 3. Messprinzip

Die Messung der Viskoelastizität kann mit einem Rotationsviskosimeter, welches nach dem Searle- oder Couette-Prinzip arbeiten kann, erfolgen. Als Messeinrichtungen können koaxiale Zylinder, Platte/Kegel oder Platte/Platte Systeme genutzt werden. Während der Messung wird die Probe einer sinusförmigen oszillierenden Deformation mit einer konstanten Frequenz und Amplitude ausgesetzt. Dies soll der Einfachheit halber anhand einer ideal elastischen und einer rein viskosen Substanz gezeigt werden.

Verbindet man eine Feder als Modell für eine idealelastische Substanz bzw. einen Dämpfer als Modell für eine rein viskose Substanz mit einer sich drehenden Scheibe, so wird durch die Drehbewegung der Scheibe eine sinusförmige Deformation ( $\gamma$ ) vorgegeben (Abb. 4) [5]. Gemessen wird die Schubspannung ( $\tau$ ). Die Schubspannung ist definiert als Kraft die auf eine bestimmte Fläche wirkt. Bei einer ideal elastischen Substanz ist die Schubspannung ( $\tau$ ) direkt proportional zur Deformation ( $\gamma$ ), d.h. die gemessene Schubspannung ist phasengleich mit der vorgegebenen Deformation. Somit ist der Phasenverschiebungswinkel ( $\delta$ ) zwischen der Deformation und der Schubspannung Null (Abb. 4 (links)).

Im Falle einer rein viskosen Substanz ist die Schubspannung ( $\tau$ ) direkt proportional zur Deformationsgeschwindigkeit. Da in dem System bei der Drehung der Scheibe um  $90^\circ$  und  $270^\circ$  eine Richtungsänderung stattfindet, ist die Geschwindigkeit an diesen Stellen und somit auch die Schubspannung Null. Die gemessene Schubspannung ist somit nicht phasengleich mit der vorgegebenen Deformation sondern es besteht ein Phasenverschiebungswinkel ( $\delta$ ) von  $90^\circ$  (Abb. 4 (rechts)).



**Abb. 4:** Vereinfachte Darstellung einer oszillierenden Feder als Modell für eine ideal elastische Substanz (links) und eines oszillierenden Dämpfers als Modell für eine rein viskose Substanz (rechts), der vorgegebenen Deformation in Abhängigkeit von der Zeit sowie der jeweils resultierenden Schubspannung in Abhängigkeit von der Zeit.

Der Phasenverschiebungswinkel ( $\delta$ ) zwischen der vorgegebenen Deformation ( $\gamma$ ) und der resultierenden Schubspannung ( $\tau$ ) ist ein Maß für die Viskoelastizität. Werden Phasenverschiebungswinkel größer  $0^\circ$  und kleiner  $90^\circ$  erhalten verhält sich die vermessene Substanz viskoelastisch. So erhält man z.B. ein Phasenverschiebungswinkel von  $45^\circ$  für ein Material was 50% elastische und 50% viskose Eigenschaften besitzt.

Die Verknüpfungsgröße zwischen der vorgegebenen Deformation ( $\gamma$ ) und der resultierenden Schubspannung ( $\tau$ ) ist das komplexe Schubmodul ( $G^*$ ). Wobei gilt:

$$\tau = G^* \times \gamma$$

Das komplexe Schubmodul ( $G^*$ ) setzt sich zusammen aus dem Speichermodul ( $G'$ ), welches ein Maß für den elastischen Anteil ist, und dem Verlustmodul ( $G''$ ), welches ein Maß für den viskosen Anteil ist. Es gilt:

$$G^* = G' + G''$$

Das Speichermodul ( $G'$ ) und das Verlustmodul ( $G''$ ) können über den Betrag des komplexen Schubmoduls ( $|G^*|$ ) und den Phasenverschiebungswinkel ( $\delta$ ) berechnet werden. Es gilt:

$$|G^*| = \frac{\tau_0}{\gamma_0}$$

$$G' = |G^*| \times \cos \delta$$

$$G'' = |G^*| \times \sin \delta$$

#### 4. Beispiel

Als Beispiel soll hier das Verhalten von natürlichem Orangensaft (ausgepresst aus Orangen) und Orangenektar (Wasser, Orangenkonzentrat, Verdickungsmittel) verglichen werden (Abb. 5).

Natürlicher Orangensaft ist eine viskose Flüssigkeit ( $G'' > G'$ ). Das im Orangenektar enthaltene Verdickungsmittel besitzt einen stark ausgeprägten elastischen Anteil. Dies kann in Abb. 5 an einem überproportionalen Anstieg des Speichermoduls ( $G'$ ) bei höherer Frequenz gesehen werden. Die elastische Komponente macht den Orangenektar beim Schlucken scheinbar dick, eine Eigenschaft die beim Trinken nicht gewünscht ist [1, 6].

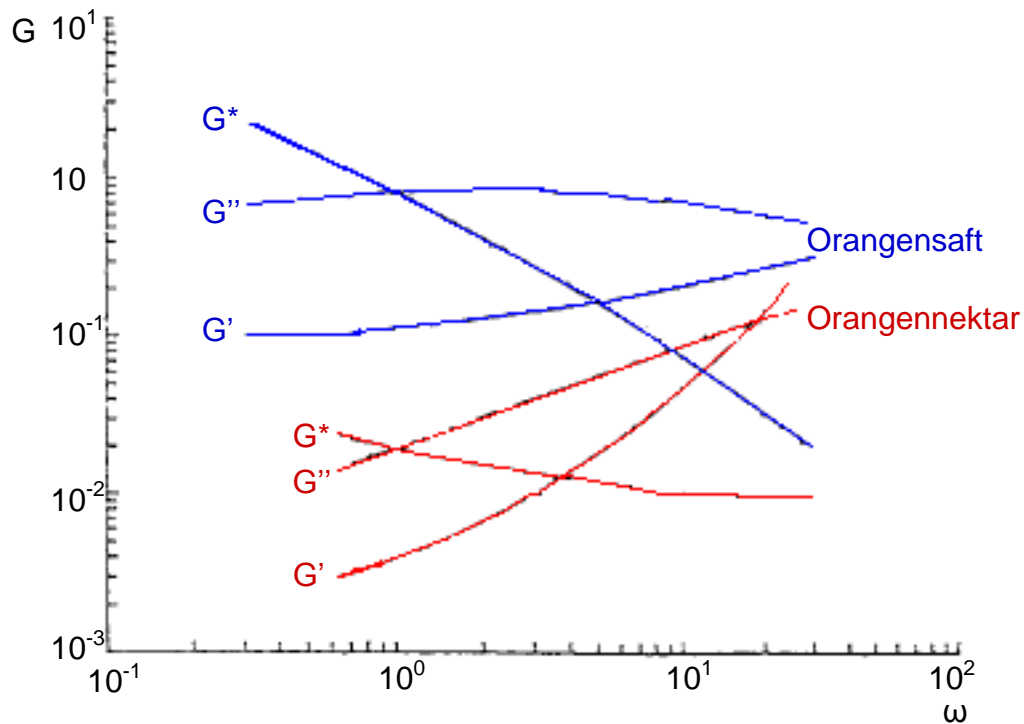


Abb. 5: Vergleich von Orangensaft und Orangenektar mit der oszillierenden Methode (modifiziert nach [6]).

## 5. Referenzen

1. J. Haag, Einführung in die Visokoelastizität, Haake Information: Karlsruhe. p. 1-17.
2. H. Schott, Rheology, in *Pharmaceutical Sciences*, Remington, Editor. 1990, Mack Publishing Co: Easton. p. 310-26.
3. An analytic overview of creep testing, Haake Information: Karlsruhe. p. 1-12.
4. A.N. Martin, P. Bustamonte, A.H. Chun, Rheology, in *Physical Pharmacy*, A.N. Martin, Editor. 1993, Lippincott Williams & Wikins. p. 453-464.
5. A general introduction to the theory of forced-oscillation, Haake Information: Karlsruhe. p. 1-14.
6. W. Marquardt, H. Niedermeier, Messen der Visokoelastizität, Haake Information: Karlsruhe. p. 1-9.