



universitätsverlag
ilmenau

Uhlig, René; Zentner, Lena:

**Ein Modell zur Dimensionierung nachgiebiger Elemente für
den Einsatz in Gassicherheitsventilen**

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012100142-035-0

URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012100142-035-0>

Erschienen in:

Mechanismentechnik in Ilmenau, Budapest und Niš : Technische Universität Ilmenau, 29. - 31. August 2012. - Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2012. - S. 35-44. (Berichte der Ilmenauer Mechanismentechnik ; 1)

ISSN: 2194-9476

ISBN: 978-3-86360-034-1 [Druckausgabe]

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012100142

URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012100142>

EIN MODELL ZUR DIMENSIONIERUNG NACHGIEBIGER ELEMENTE FÜR DEN EINSATZ IN GASSICHERHEITSENTILEN

René Uhlig, Lena Zentner

Technische Universität Ilmenau
Fachgebiet Mechanismentechnik

Kurzfassung

In diesem Artikel werden theoretische und experimentelle Untersuchungen an vorgespannten nachgiebigen Aufhängungselementen für den Einsatz in Gassicherheitsventilen vorgestellt. Aus den Ergebnissen numerischer Simulationen wird ein Berechnungsmodell zur Ermittlung der Kraft-Verschiebungs-Kennlinien abgeleitet. Dieses Modell kann zukünftig zur Dimensionierung der nachgiebigen Aufhängungselemente ohne aufwändige numerische Simulationen eingesetzt werden. Die derartige Herangehensweise wird durch experimentelle Ergebnisse erfolgreich belegt.

Abstract

The paper deals with theoretical and experimental examinations of pre-stressed elastic mounting elements for the application in gas safety-valves. From the results of numerical simulations, an evaluation-model for the calculation of the force-displacement-characteristics is derived. Prospective, this model allows the dimensioning of the mounting elements without complex simulations. The described approach is verified by experimental results.

1. Einleitung

Sicherheitsventile für Gasrohrleitungen spielen bei der Betrachtung von Aspekten der zivilen Sicherheit eine wichtige Rolle. Untersuchungen zeigen, dass rund 95 % aller Gasexplosionen auf vorsätzliche oder fahrlässige Manipulationen zurückzuführen sind. Als Ursache für die verbleibenden 5 % sind maßgeblich Baggerangriffe im Rahmen von Baumaßnahmen auszumachen [2]. Nicht erfasst sind die jüngsten Auswirkungen von Naturkatastrophen, wie beispielsweise Erdbeben.

Um die Folgen von Gasunfällen drastisch zu mindern, werden Gasströmungswächter (nachfolgend GSW) eingesetzt. Erreicht der Gasstrom in dem zu überwachenden Leitungsabschnitt einen unzulässig hohen Wert, so wird der Gasstrom durch den GSW abgesperrt. In der neuartigen Lösung [4] in Abb. 1 kommen nachgiebige vorgespannte Blattfederelemente zum Einsatz, wodurch auch nach einem Druckausgleich in der Gasleitung der GSW in der geschlossenen Schaltstellung verbleibt. Im Gegensatz zu herkömmlichen GSW [3] ist es möglich, zunächst die Ursache der Störung zu identifizieren, bevor der Gasstrom wieder freigegeben wird.

2. Aufbau und Funktionsweise des neuartigen Gasströmungswächters

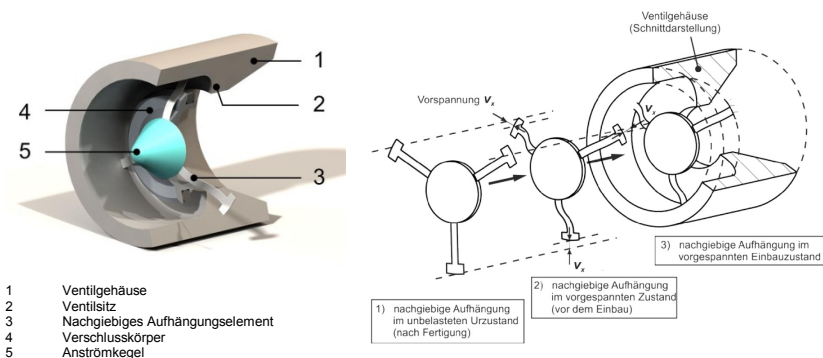


Abb. 1: Neuartiger Gasströmungswächter

Der Verschlusskörper des neuartigen GSW wird über drei radial angeordnete blattfederartige Aufhängelemente im Ventilgehäuse befestigt. Die Besonderheit besteht dabei darin, dass die Aufhängelemente beim Einbau im Ventilgehäuse elastisch vorgespannt werden (Abb. 1, rechts).

Aufgrund der geometrischen Vorspannung v_x werden die Aufhängelemente elastisch verformt [6], dadurch stellt sich ein bistabiles Ventilschaltverhalten ein. Wirkt im geöffneten Zustand eine Kraft F_y auf den Verschlusskörper infolge der Durchströmung der Gasrohrleitung, so wird dieser zunächst nur um einen vergleichsweise kleinen Verschiebungswert u_y ausgelenkt (Abb. 2). Übersteigt die Kraft F_y einen definierten Wert (Durchschlagpunkt beim Schließen), so kommt es aufgrund der abfallenden Kraft-Verschiebungs-Kennlinie (nachfolgend KVK) zu einer schlagartigen Verschiebung des Verschlusskörpers in den Punkt 2 [5]. Der Übergang des Ventils vom Punkt 1 der KVK in den Punkt 2 der KVK äußert sich als Durchschlageffekt. Das Ventil ist geschlossen. Ohne äußere Kräfte verbleibt das Ventil in der geschlossenen Schaltstellung. Zum Öffnen ist eine entgegengesetzte Kraft $-F_y$ erforderlich. Mit Überschreiten des Punktes 3 erfolgt ein dynamischer Öffnungsvorgang in Richtung des Punktes 4, der ebenfalls durch einen Durchschlag gekennzeichnet ist.

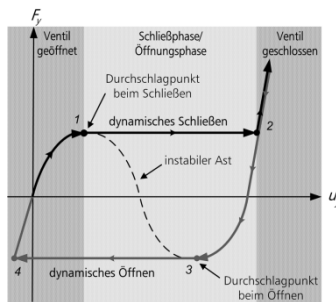


Abb. 2: Kraft-Verschiebungs-Kennlinie des Ventils (bistabiles Schaltverhalten)

Für das Schaltverhalten des Ventils ist die kombinierte KVK der nachgiebigen Aufhängelemente von elementarer Bedeutung. Bei idealisierter Betrachtung kann davon ausgegangen werden, dass die KVK der Aufhängelemente untereinander identisch sind. Somit ist die Untersuchung der KVK für ein einzelnes Aufhängelement ausreichend, um Rückschlüsse auf die Gesamtkennlinie der nachgiebigen Aufhängung ziehen zu können.

3. Numerische Simulation

Die Ermittlung der KVK erfolgt anhand numerischer Simulationen in ANSYS® *Classic* unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode (*FEM*). Die Vernetzung mit dem Elementtyp *Solsh190* eignet sich hervorragend für die Berechnung von flachen oder dünnwandigen Strukturen [1]. Die Simulation teilt sich grundlegend in zwei Simulationsabschnitte. Im ersten Abschnitt werden die Vorspannung der Aufhängungselemente und der daraus resultierende Spannungs- und Verformungszustand berechnet. Die Ergebnisse werden anschließend exportiert, so dass diese für den zweiten Simulationsabschnitt zur Verfügung stehen. Im zweiten Abschnitt wird eine neue Analyse gestartet, die als Anfangszustand den vorgespannten Zustand verwendet, der im ersten Simulationsabschnitt ermittelt wurde. Dazu werden die Ergebnisse des ersten Abschnittes in der neuen Analyse importiert. Diese getrennte Betrachtung ist sinnvoll, um die erforderlichen Randbedingungen möglichst realitätsnah nachbilden zu können.

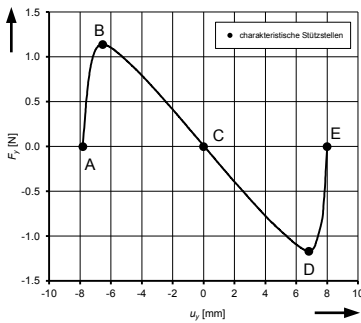
Innerhalb des zweiten Analyseabschnittes wird eine schrittweise Verschiebung des Verschlusskörpers von der geöffneten Ventilstellung in die geschlossene Ventilstellung simuliert. Für jeden untersuchten Verschiebungswert u_y wird die resultierende Verschiebungskraft F_y ermittelt, die notwendig ist, damit das mechanische System im Gleichgewicht ist. Aus der Darstellung der untersuchten Kraft-Verschiebungs-Punkte in einem gemeinsamen Diagramm lässt sich die zu gesuchte KVK generieren.

Für die Geometrie der untersuchten Aufhängungselemente wurde ein gleichbleibender rechteckiger Querschnitt mit einer einheitlichen Breite $b = 5$ mm und einer Dicke d zwischen 0,05 mm und 0,5 mm festgelegt. Die Länge l wurde im Bereich von 10 mm bis 200 mm untersucht. Als Materialverhalten wurde ein linear-elastisches Verhalten gewählt, die Kennwerte des Materialmodells orientieren sich an den technischen Kennwerten von Federstahlblech (1.4310). Der E-Modul wird mit einem Wert von 190 GPa berücksichtigt.

4. Ausgewählte Simulationsergebnisse

In Abb. 3 ist exemplarisch die simulierte KVK für ein Aufhängungselement dargestellt. Es sind fünf charakteristische Stützstellen A - E gekennzeichnet, durch die sich eine qualitativ hinreichende Beschreibung der KVK mit den wesentlichen Verlaufsmerkmalen vornehmen lässt. Die Stützstelle A

markiert die vorgespannte Ausgangslage, B und D stellen jeweils die Durchschlagpunkte dar. Die Stützstelle E entspricht der zweiten stabilen Lage, in der sich das Ventil im geschlossenen Zustand befindet. Mit der Stützstelle C wird derjenige Verschiebungswert u_y markiert, bei dem die Verschiebungskräfte F_y das Vorzeichen wechseln. Die Stützstellen lassen sich durch charakteristische Verschiebungswerte u_y und die zugehörige Verschiebungskraft F_y quantitativ beschreiben.



charakteristische Stützstellen	
A	$F_{yA} = F_y(u_{yA}) = 0$ $u_{yA} < 0$
B	$F_{yB} = F_y(u_{yB}) = \text{Max}(F_y) = F_{y\text{max}}$ $u_{yB} = u_{y\text{max}}$
C	$F_{yC} = F_y(u_{yC}) = 0$ $u_{yC} = 0$
D	$F_{yD} = F_y(u_{yD}) = \text{Min}(F_y) = F_{y\text{min}}$ $u_{yD} = u_{y\text{min}}$
E	$F_{yE} = F_y(u_{yE}) = 0$ $u_{yE} > 0$

Abb. 3: Kraft-Verschiebungs-Kennlinie mit den charakteristischen Stützstellen A – E

4.1. Normierte Grundcharakteristik

Bei qualitativer Betrachtung weisen die KVK desselben Aufhängungselementes für verschiedene Vorspannungswerte v_x untereinander eine sehr ähnliche Charakteristik auf (Abb. 4).

Neben den charakteristischen Stützstellen A - E sind alle KVK durch eine Punktsymmetrie zum Koordinatenursprung gekennzeichnet. Im Bereich zwischen den Extremstellen verlaufen die Graphen annähernd linear und mit gleichem Anstieg. Durch die normierende Darstellung der einzelnen KVK in den dimensionslosen Größen u und F (Gleichung (1)) ist es möglich, die qualitativen Verläufe der KVK in eine untereinander vergleichbare Darstellung zu bringen.

$$u = \frac{u_y}{|u_{yA}|} \qquad F = \frac{F_y}{|F_{y\text{max}}|} \qquad (1)$$

Bei der Zusammenführung aller normierten KVK in einem gemeinsamen Diagramm ist festzustellen, dass die normierten KVK für alle Aufhängungselemente gleich sind (Abb. 5). Es kann daher von einer gemeinsamen normierten Grundcharakteristik ausgegangen werden.

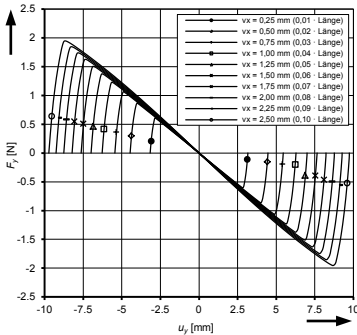


Abb. 4: Kraft-Verschiebungs-Kennlinien für ein Aufhängungselement der Länge $l = 25$ mm und Dicke $d = 0,1$ mm

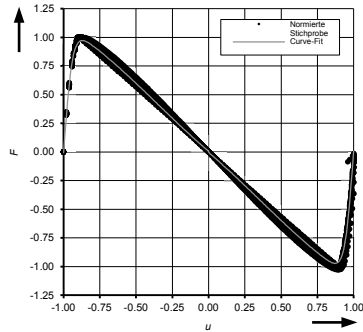


Abb. 5: Normierte Kraft-Verschiebungs-Kennlinien (Darstellung der Datenpunkte) und Curve-Fit

4.2. Betrag der Anfangsauslenkung $|u_{yA}|$

In Abb. 4 ist ersichtlich, dass sich mit zunehmender Vorspannung v_x der Betrag der Anfangsauslenkung $|u_{yA}|$ vergrößert. Somit vergrößert sich auch der verfügbare Ventilweg. In Abb. 6 sind die betragsmäßigen Anfangsauslenkungen für unterschiedliche Längen l der Aufhängungselemente in Abhängigkeit der dimensionslosen Vorspannung v (Gleichung (2)) dargestellt. Durch die zusätzliche Normierung der Ordinatenachse, kann ein Zusammenhang abgeleitet werden, der für alle Aufhängungselemente gleichermaßen Gültigkeit besitzt (Abb. 7).

$$v = \frac{v_x}{l} \quad u_l = \frac{|u_{yA}|}{l} \quad (2)$$

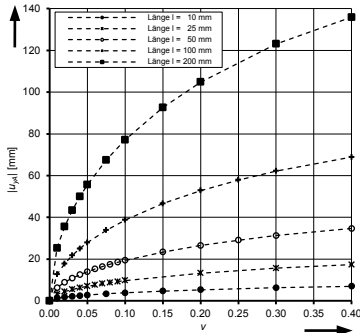


Abb. 6: $|u_{yA}|$ in Abhängigkeit von v für verschiedene Längen l des Aufhängeelementes

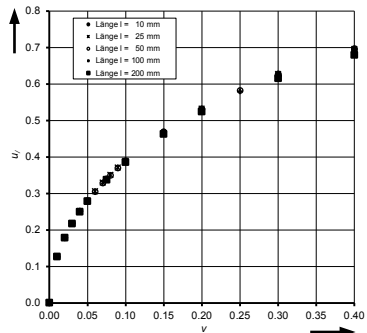


Abb. 7: u_j in Abhängigkeit von v

4.3. Kräfte $|F_{y_{max}}|$ und $|F_{y_{min}}|$ in den Extremstellen

Die ermittelten KVK zeigen im Bereich zwischen den beiden Extremstellen einen annähernd linearen Verlauf. Bei Betrachtung der KVK desselben Aufhängeelementes unter verschiedenen Vorspannungen v ist der Anstieg im Bereich zwischen den Extremstellen gleich. Somit lässt sich die Lage der Extremstellen durch eine Ursprungsgerade mit dem Anstieg G sehr gut beschreiben (Abb. 8). Für verschiedene Aufhängeelemente ergeben sich unterschiedliche Werte für den Anstieg G der Ursprungsgerade (Abb. 9).

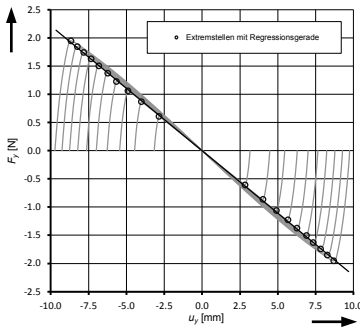


Abb. 8: Extremstellen der Kraft-Verschiebungs-Kennlinie

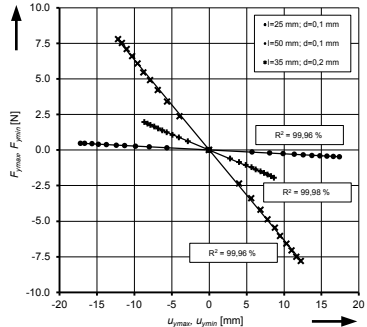


Abb. 9: Lage der Extremstellen für verschiedene Aufhängeelemente

4.4. Modell zur Ermittlung der Kraft-Verschiebungs-Kennlinie

Wie gezeigt wurde, lassen sich die KVK der untersuchten Aufhängungselemente unter Verwendung der dimensionslosen Größen u und F auf die gemeinsame normierte Grundcharakteristik aus Abb. 5 zurückführen. Für die Normierungsfaktoren $|u_{yA}|$ und $|F_{y\max}|$ konnten allgemeingültige Zusammenhänge identifiziert werden. Aus den abgeleiteten Zusammenhängen konnte das Gleichungssystem (3) entwickelt werden. Damit ist ein Werkzeug verfügbar, das es ermöglicht die KVK eines Aufhängungselementes in guter Näherung zu berechnen, ohne aufwändige numerische Simulationen durchführen zu müssen.

$$u = \frac{u_y}{|u_{yA}|} \quad |u_{yA}| = a \cdot l \cdot v^b \quad \text{mit } a = 1,06 \quad \text{und} \quad b = 0,445$$

$$F = \frac{F_y}{|F_{y\max}|} \quad F_{y\max} = \beta \cdot |u_{yA}| \cdot \left(\frac{d}{l}\right)^3 \quad \text{mit } \beta = 3083340 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

$$v = \frac{v_x}{l} \quad (3)$$

$$F(u) = -\text{sign}(u) \cdot \left[t_1 + \left(\frac{t_2}{1 + e^{\frac{2(|u|+t_3)-w_1}{2w_2}}} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + e^{\frac{2(|u|+t_3)+w_1}{2w_3}}} \right) \right] \rightarrow u = [-1; +1]$$

$$\begin{array}{lll} t_1 = -0,76 & t_2 = 2,35 & t_3 = -0,669 \\ w_1 = 0,64 & w_2 = 0,028 & w_3 = 0,48 \end{array}$$

5. Experimentelle Überprüfung der Simulationsergebnisse

Für die Überprüfung der aus den numerischen Simulationen gewonnenen Ergebnisse sind experimentelle Untersuchungen an realen nachgiebigen Aufhängungselementen notwendig. Dazu wurde anhand des technischen Prinzips in Abb. 10 ein speziell entwickelter Versuchsaufbau umgesetzt,

dessen Basis ein computergesteuertes Kraft-Weg-Messsystem *Zwick/Roell Z005* bildet (Abb. 11).

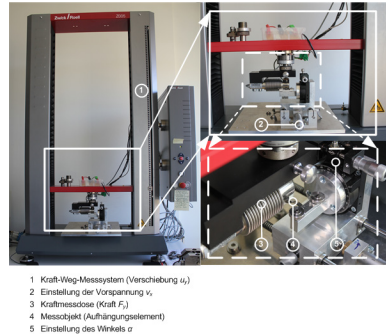
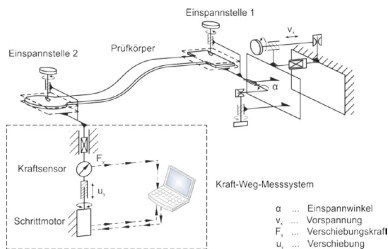


Abb. 10: Technisches Prinzip der experimentellen Versuchsvorrichtung

Abb. 11: Kraft-Weg-Messsystem mit eingebauter Versuchsvorrichtung und Prüfkörper

Das zu prüfende Aufhängungselement wird an beiden Enden in der Versuchsvorrichtung fixiert und anschließend vorgespannt. Über das Kraft-Weg-Messsystem wird das Aufhängungselement schrittweise in Verschiebungsrichtung ausgelenkt. Dabei wird über den Kraftsensor an den aufeinanderfolgenden Verschiebungspunkten die Reaktionskraft ermittelt und die KVK gebildet.

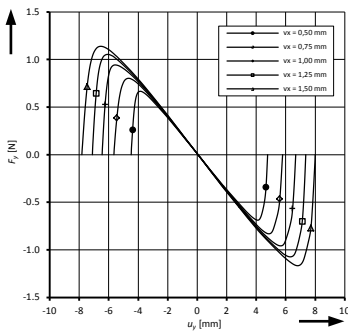


Abb. 12: Experimentell ermittelte Kraft-Verschiebungs-Kennlinie

In Abb. 12 sind exemplarisch die KVK für ein ausgewähltes reales Aufhängungselement dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Charakteristik der Kennlinien im Vergleich zu den über Simulationen ermittelten Charakteristika, die gleichen Verlaufsmerkmale aufweist. Ein Vergleich der Verschiebungswerte u_y liefert eine ausgesprochen gute Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen. Im Bereich der Verschiebungskräfte F_y ist festzustellen, dass die experimentell ermittelten Werte im Mittel ca. 15 %

niedriger ausfallen, als die simulierten Kräfte. Im Rahmen einer umfangreichen Fehlerbetrachtung stellte sich heraus, dass diese Abweichungen als akzeptabel einzustufen sind und u. a. auf Messungenauigkeiten zurückgeführt werden können.

Zusammenfassung

Die Kraft-Verschiebungs-Kennlinie (KVK) eines neuartigen Gasströmungswächters ist für dessen Funktion von elementarer Bedeutung. Für die Ermittlung der KVK waren bislang aufwändige numerische Simulationen unter Verwendung der *Finite-Elemente-Methode* erforderlich. Anhand der durchgeführten Untersuchungen und den daraus vorliegenden Ergebnissen konnte ein Modell zur Berechnung der KVK für Aufhängungselemente unterschiedlicher Dimensionen abgeleitet werden. Durch eine experimentelle Überprüfung anhand realer Aufhängungselemente, konnten die Berechnungsergebnisse unter Berücksichtigung messtechnischer Fehler verifiziert werden.

Literatur

- [1] Banerjee, Biswajit: A comparison of Ansys Shell181 and Solsh190 Elements. iMechanica – web of mechanics and mechanicians, 2011 [gefunden unter: <http://imechanica.org/node/10566>]
- [2] Gaze, Thomas: Hohe Deckungssummen. 2001 [gefunden unter: http://www.funk-gruppe.de/de/unternehmensgruppe/aktuelles/news/letter_uebersicht.php?did=18788]
- [3] Oventrop: Datenblatt GS Gasströmungswächter
- [4] Offenlegungsschrift DE 10 2007 032 55 A1, 29.05.2008
- [5] Pflüger, Alf: Stabilitätsprobleme der Elastostatik. Berlin: Springer Verlag, 1975
- [6] Timoshenko, Stephen P.; Gere, James M.: Theory of elastic stability. New York: McGraw-Hill Book Company Timoshenko, 1961