

FEM-basierte Untersuchung der Formgebung nachgiebiger Durchschlagelemente für Gasströmungswächter

Lars, Hartmann*; Lena, Zentner**

* TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Mechanismentechnik
lars.hartmann@tu-ilmenau.de

** TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Mechanismentechnik
lena.zentner@tu-ilmenau.de

Kurzfassung

Dieser Beitrag beinhaltet die simulationsbasierte, nicht-lineare Untersuchung der Formgebung nachgiebiger Durchschlagelemente für den Einsatz in bistabilen Gasströmungswächtern. Mithilfe der FEM wird das Kraft-Verschiebungs-Verhalten von vorgespannten Durchschlagelementen unterschiedlicher geometrischer Form zur Beurteilung des Auslöseverhaltens von bistabilen Gasströmungswächtern untersucht. Für die untersuchten geometrischen Formen der Durchschlagelemente und die gewählten Parameter zeigen die Kraft-Verschiebungs-Kennlinien eine bistabile Charakteristik. Die Formgebung beeinflusst die Steifigkeit und damit die für den Durchschlag erforderliche Kraft.

Abstract

This contribution is about the simulation-based investigation of the geometric shape of compliant snap-through elements for excess flow valves. To evaluate the closing behavior of excess flow valves the force-displacement-behavior of preloaded planar patterns with different geometric shapes is analyzed by using the FEM. The determined force-

displacement-behavior as the result of investigation exhibits a bistable snap-through characteristic for different geometric shapes and an influence of these geometric shapes on the stiffness and the force, which is required for the snap-through.

1 Einführung

Gasströmungswächter sind Sicherheitsventile, die einen aktiven Schutz zur Vermeidung von Unfällen, infolge von Havarie oder Manipulation an gastechnischen Anlagen darstellen. Ab einem definierten kritischen Durchfluss verschließt der installierte Gasströmungswächter selbsttätig die Rohrleitung. Bei herkömmlichen federbelasteten Gasströmungswächtern hebt bei einem Druckausgleich ein scheibenförmiger Verschlusskörper durch die Federkraft unkontrolliert vom Ventil Sitz ab und gibt den Gasstrom wieder frei, gegebenenfalls trotz bestehender Havarie. Ein neuartiger bistabiler Gasströmungswächter [1, 2] Abb. 1 (a), bei dem die herkömmliche feinmechanische Struktur mit Schraubendruckfeder durch ein nachgiebiges Durchschlagelement ersetzt wurde, ist so konzipiert, dass er im Havariefall die Gasleitung automatisch absperrt und diese auch bei Druckausgleich geschlossen bleibt. Somit bleibt ein Öffnen des geschlossenen Gasströmungswächters qualifiziertem Fachpersonal nach Beseitigung der Havarie vorbehalten. Die Bistabilität, die durch zwei definierte Lagen – offener und geschlossener Zustand des Gasströmungswächters – gekennzeichnet ist, wird durch radiale Vorspannung einer planaren nachgiebigen Struktur Abb. 1 (b) erreicht und schafft die Voraussetzung für den mechanischen Durchschlageffekt des vorgespannten Durchschlagelementes Abb. 1 (c) im Gasströmungswächter.

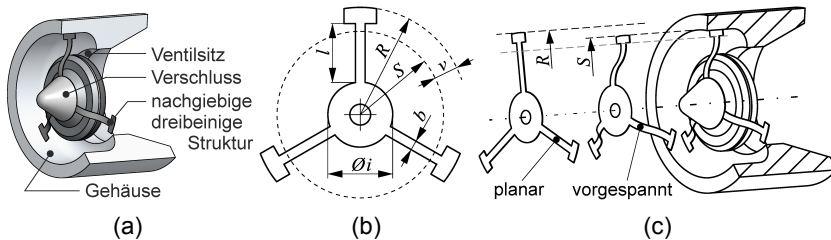


Abb. 1: Gasströmungswächter mit nachgiebigem Durchschlagelement:
 (a) - bistabiler Gasströmungswächter, (a) - planares Durchschlagelement,
 (c) - Vorspannung des planaren Durchschlagelementes durch Montage [1, 2]

2 Ziel der Untersuchung

Ein wesentliches Ziel bei der Entwicklung von Gasströmungswächtern mit nachgiebigen Durchschlagelementen ist die Einhaltung der nach DVGW geforderten Auslösecharakteristik für Gasströmungswächter, die mithilfe des Schließfaktors beurteilt wird. Gemäß [3] ist ein Schließfaktor, der als Verhältnis von Schließdurchfluss bei dem die Strömungswiderstandskraft (Druckkraft) den Durchschlag des nachgiebigen Mechanismus bewirkt und Nenndurchfluss definiert ist, im Bereich von 1,3 bis 1,8 zu realisieren. Da der Schließfaktor experimentell ermittelt wird, kann das Kraft-Verschiebungs-Verhalten der nachgiebigen Durchschlagelemente als Bemessungs- und Bewertungsgrundlage bei der Entwicklung der Schließmechanismen genutzt werden. Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht den Vergleich zwischen den Kraft-Verschiebungs-Kennlinien realer federbelasteter Gasströmungswächter (Abb. 2 (a)), die mithilfe einer Universalprüfmaschine gemessen wurden und den möglichen, nur schematisch dargestellten, Kraft-Verschiebungs-Kennlinien von Gasströmungswächtern mit Durchschlagelementen (Abb. 2 (b)), die trotz eines anderen Wirkprinzipes eine ähnliche Auslösecharakteristik bzw. einen vergleichbaren Schließdurchfluss aufweisen.

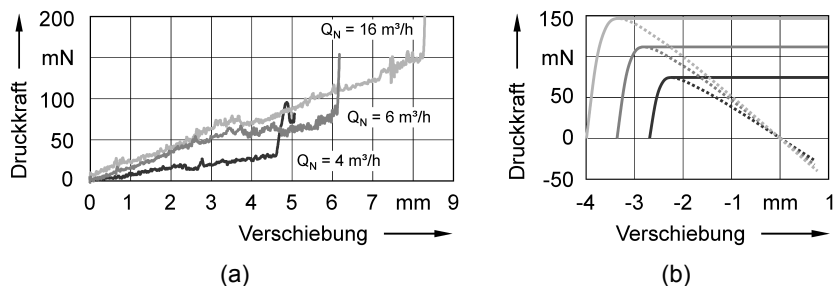


Abb. 2: Kraft-Verschiebungs-Kennlinien von Gasströmungswächtern:
 (a) - Kraft-Verschiebungs-Kennlinien von federbelasteten Gasströmungswächtern für drei Nenndurchflüsse, (b) - zu (a) vergleichbare Kraft-Verschiebungs-Kennlinien für bistabile Gasströmungswächter

Das Schließen des Gasströmungswächters erfolgt beim Erreichen der Schließkraft, das in der Abb. 2 (a) durch den starken Anstieg der Druckkraft und in Abb. 2 (b) durch das Erreichen des globalen Maximums verdeutlicht wird.

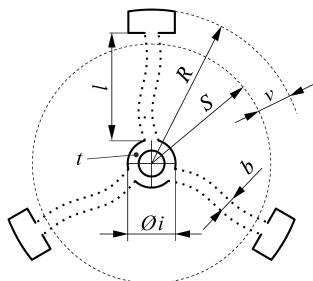
Vorausgegangene Untersuchungen mit einfachen dreibeinigen Durchschlagelementen haben gezeigt, dass das Kraft-Verschiebungs-Verhalten bzw. der Schließfaktor einerseits durch die Anpassung der geometrischen Parameter einer ausgewählten planaren Dreibeinstruktur (vgl. Abb. 1 (b)) sowie der Größe der radialen Vorspannung und andererseits durch die Art der Lagerung des Durchschlagelementes beeinflussbar ist [1, 2]. Bei der messtechnischen Prüfung des Auslöseverhaltens gemäß DVGW zeigten verschiedene Konfigurationen von Dreibeinstrukturen mit unterschiedlichen Lagerungen und radialen Vorspannungen tendenziell einen zu hohen Schließfaktor, eine erhöhte Störanfälligkeit beim Schließen und eine parasitäre Kippneigung, die eine Schiefstellung des Verschlusses zum Ventil Sitz bewirkt, sodass das dichte Verschließen behindert wird. Ein bisher nicht untersuchter Aspekt, der großes Potenzial zur Realisierung eines bistabilen Gasströmungswächters mit gefordertem Schließfaktor bietet, ist die geometrische Formgebung bzw. Gestalt der Durchschlagelemente im planaren Zustand.

In diesem Beitrag wird der Einfluss der geometrischen Formgebung der Durchschlagelemente im planaren Zustand auf das Kraft-Verschiebungs-Verhalten des Schließmechanismus mithilfe der Methode der Finiten Elemente (FEM) untersucht. Die FEM-basierten Untersuchungen mit geometrischen Nichtlinearitäten (große Verformungen) erfolgen für eingespannte Durchschlagelemente unterschiedlicher geometrischer Form unter gleicher radialer Vorspannung.

3 Grundstruktur des nachgiebigen Durchschlagelementes und geometrische Varianten

Die Grundstruktur des nachgiebigen Durchschlagelementes im planaren Zustand (Abb. 3) ist durch eine bestimmte Anzahl von Beinchen, die gleichmäßig an einem Innenring mit Bohrung zur Befestigung des Verschlusses angebracht sind und an den Enden Verbreiterungen zur Einspannung im Gehäuse ausweisen, definiert. Geometrisch wird die Grundstruktur durch fest vorgegebene Parameter beschrieben: Durchmesser des Innenrings i , Beinlänge l , Beinbreite b , Materialstärke t und Vorspannung v , die sich entsprechend Abb. 3

durch den Radius im planaren Zustand R und den Radius in eingebauter Lage S ergibt.



Parameter	Wert in mm
i	5
l	11
b	1
t	0,05
v	1
R	16
S	15

Abb. 3: Grundstruktur des nachgiebigen Durchschlagelementes mit fest vorgegebenen geometrischen Parametern nach [2]

In der Abb. 4 sind die verschiedenen Varianten (a) bis (f) des Durchschlagelementes für die Untersuchung aufgelistet. Die abgebildeten geometrischen Varianten unterscheiden sich hinsichtlich der Formgebung der Beinchen und l oder der Anzahl der Beinchen.

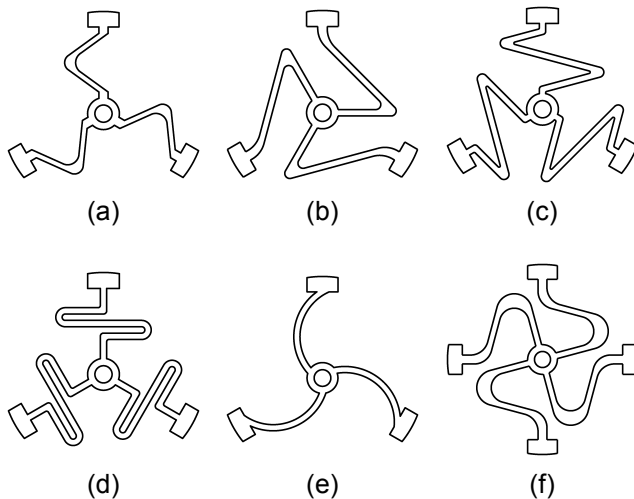


Abb. 4: Geometrische Varianten des Durchschlagelementes mit verschiedenen Formgebungen und unterschiedlicher Anzahl von Beinchen

4 Simulationsbasierte Untersuchung mithilfe der FEM

Zur FEM-basierten Untersuchung der nachgiebigen Durchschlagelemente mit unterschiedlicher geometrischer Formgebung (Varianten nach Abb. 4) wird das FE-Programm Ansys Workbench verwendet. Die Untersuchung wird unter Berücksichtigung geometrischer Nichtlinearitäten durchgeführt, da sich infolge der Verformung (mechanischer Durchschlag) die Steifigkeit des mechanischen Systems verändert und gegebenenfalls Knickerscheinungen zu berücksichtigen sind. Für die schalenartige Geometrie und die zu erwartenden Verformungen der Durchschlagelemente sind ein geeigneter Elementtyp und eine hinreichend genaue Vernetzung zu wählen. Die Diskretisierung der Durchschlagelemente erfolgt durch Solid-Shell-Elemente mit einer Elementgröße von 0,25 mm und einem isotropen, linear-elastischen Materialgesetz für Stahl (HOOKE'sches Gesetz). Ein Dummy aus Solid-Elementen, der fest mit den Durchschlagelementen verbunden ist, modelliert den Verschlusskörper.

Die Simulationen für die einzelnen Formgebungen erfolgen jeweils in zwei Schritten. Zunächst wird das Durchschlagelement radial vorgespannt, sodass die planare Struktur auswölbt. Dazu werden die Verbreiterungen der Beinchen um den Betrag der Vorspannung v schrittweise zur Mitte hin verschoben. Um die Richtung der Auswölbung vorzugeben, wird eine axiale Anschubkraft F_a in z -Richtung definiert.

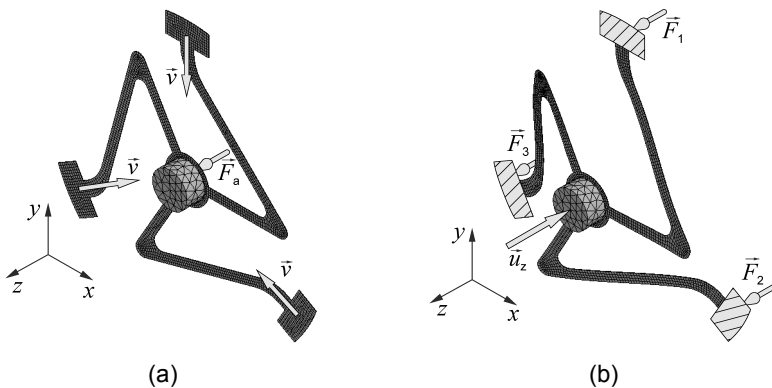


Abb. 5: FEM-Modell zur Ermittlung des Kraft-Verschiebungs-Verhaltens:
 (a) - FEM-Modell für die radiale Vorspannung (1. Lastschritt), (b) - FEM-Modell für den verschiebungsgesteuerten Durchschlag (2. Lastschritt)

Im zweiten Schritt wird der eigentliche mechanische Durchschlag simuliert. Ausgehend von der vorgespannten (ausgewölbten) Lage des Durchschlagelementes, die Ergebnis des ersten Simulationsschrittes ist, wird der Verschluss verschiebungsgesteuert von einer stabilen Lage in die zweite stabile Lage um die Verschiebung u_z bewegt. Der Verschluss wird während des mechanischen Durchschlages an der Zylindermantelfläche reibungsfrei gelagert, um eine konvergierende Lösung zu erreichen. Eine mögliche Verkippung und Schiefstellung des Verschlusses wird damit in der Simulation unterdrückt, sodass die Simulation keine Aussagen zum realen Dichtverhalten liefern kann. Die numerische Simulation von Durchschlagproblemen ist stark nicht-linear und führt zu physikalischen Konvergenzproblemen, die aus der sprunghaften Steifigkeitsveränderung der Struktur resultieren. Damit das Systemverhalten nach dem Erreichen der zum mechanischen Durchschlag erforderlichen Kraft abgebildet wird, ist eine verschiebungsgesteuerte Analyse zu bevorzugen. Für die verschiebungsgesteuerte Simulation wird die zum Durchschlag erforderliche Kraft als Reaktionskraft F_z an den Einspannungen der einzelnen Beinchen ausgewertet ($F_z = F_1 + F_2 + F_3$). Erwartungsgemäß ist diese Kraft durch die zusätzliche Lagerung der Zylindermantelfläche in der Simulation größer als in der Wirklichkeit.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der FEM-Simulation für die verschiedenen Formen dargestellt und hinsichtlich allgemeiner Aussagen zum Kraft-Verschiebungs-Verhalten von Gasströmungswächtern mit entsprechenden nachgiebigen Durchschlagelementen ausgewertet.

5 Simulationsergebnisse und Diskussion

In der Abb. 6 ist das Kraft-Verschiebungs-Verhalten der ausgewählten Varianten (vgl. Abb. 4) für eingespannte Beinchen bei gleicher Vorspannung als Ergebnis der FEM-Simulationen dargestellt.

Die Kraft-Verschiebungs-Kennlinien in Abb. 6 zeigen für alle Formgebungen das Verhalten eines mechanischen Durchschlages. Eine zunehmende Abnahme der Kraft für positive Verschiebungen ($u_z > 0$) ist simulationsbedingt und entspricht nicht der Wirklichkeit.

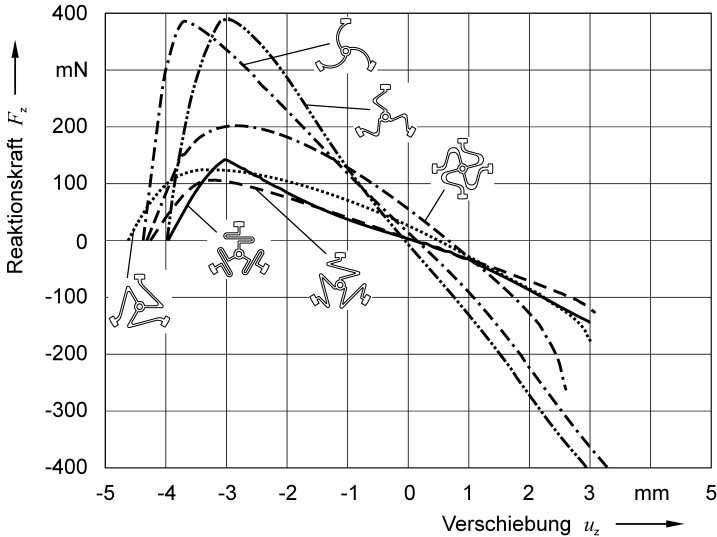


Abb. 6: FEM-basiertes Kraft-Verschiebungs-Verhalten von nachgiebigen Durchschlagelementen unterschiedlicher Formgebung für eingespannte Beinchen bei gleicher radialer Vorspannung

Vielmehr sind die reellen Kraft-Verschiebungs-Kennlinien punktsymmetrisch, da für die beiden stabilen Lagen, d. h. vor und nach dem Durchschlag, keine axiale Kraft F_z an den Einspannungen zu verzeichnen ist. Die stabilen Lagen werden durch die maximale Auslenkung $\pm u_z^{\max}$ der Durchschlagelemente gegenüber der Nulllage (planare Struktur) charakterisiert. Der Betrag dieser maximalen Auslenkung $|u_z^{\max}|$ (Auswölbung) wird durch die Formgebung der Durchschlagelemente und die aufgebrachte radiale Vorspannung definiert. Für eine radiale Vorspannung von $v = 1,0$ mm liegt die maximale Auslenkung der Durchschlagelemente der untersuchten Formgebungen und Parameter etwa zwischen $-4,6$ mm und $-4,0$ mm. Damit ermöglichen alle Formgebungen bei 1 mm radialer Vorspannung einen Hub des Verschlusses zwischen 8,0 mm und 9,2 mm. Bei allen Kraft-Verschiebungs-Kennlinien in Abb. 6 steigt die Reaktionskraft F_z für zunehmende Verschiebung u_z bis zu einem globalen Kraftmaximum F_z^{\max} stetig an. An diesem globalen Maximum wird unter der Wirkung der Schließkraft F_z^{\max} der mechanische Durchschlag initiiert, der das Durchschlagelement ohne weitere Kräfteinwirkung in die zweite stabile Lage bewegt. Für den mechanischen Durchschlag sind bei

verschiedenen Formgebungen unter den gegebenen Parametern (vgl. Abb. 3) Schließkräfte zwischen 100 mN und 400 mN erforderlich. Den Maximal Kräften F_Z^{\max} sind abhängig von der Formgebung Verschiebungen u_z' zugeordnet, die ebenfalls den mechanischen Durchschlag charakterisieren. Ein Vergleich dieser zum Schließen des Gasströmungswächters notwendigen Verschiebungen u_z' in Abb. 2 (a) und Abb. 6 zeigt, dass bei herkömmlichen federbelasteten Gasströmungswächtern eine wesentlich größere Verschiebung zum Schließen zurückgelegt werden muss. Eine Interpretation der Kraft-Verschiebungs-Kennlinien für positive Verschiebungen ($u_z > 0$) wird nicht durchgeführt, da diese Kurvenabschnitte nicht der Wirklichkeit entsprechen. Durch den Vergleich der Schließkräfte in Abb. 2 (a) und Abb. 6 ergibt sich die Eignung der Varianten (b), (c), (d) und (f) der Abb. 4 für bistabile Gasströmungswächter, sodass diese für eine experimentelle Untersuchung des Schaltverhaltens und der Störanfälligkeit der Struktur ausgewählt werden, um abschließend Aussagen über eine Eignung der Formen für den Einsatz in Gasströmungswächtern nach Prüfgrundlage VP 305-1 zu treffen.

6 Schlussfolgerung und Zusammenfassung

Einige der entwickelten Formgebungen des nachgiebigen Durchschlagelementes für den Einsatz in bistabilen Gasströmungswächtern zeigen ein günstiges Kraft-Verschiebungs-Verhalten. Mit den durch Simulation ermittelten Werten für die Schließkraft wird eine Entwicklung von bistabilen Gasströmungswächtern, die das geforderte Auslöseverhalten gemäß der gültigen Prüfgrundlage einhalten, ermöglicht. Dafür sind besonders Formgebungen, die einen ausreichenden Hub des Durchschlagelementes bzw. des Verschlusses und eine nicht zu hohe Steifigkeit gewährleisten, geeignet. Der Hub wird wesentlich durch den Außenradius der Durchschlagelemente im planaren Zustand R , die Beinlänge l und die radiale Vorspannung ν beeinflusst. Eine zunehmende Vorspannung vergrößert den Hub, erhöht aber auch die Steifigkeit des Systems und somit die Schließkraft des Gasströmungswächters. Die Steifigkeit wird neben der Vorspannung und dem Elastizitätsmodul des Materials durch die Form der Durchschlagelemente, d. h. durch die geometrische Gestaltung und die Anzahl der Beinen definiert. Dabei sind die mechanischen Beanspruchungen, die beim mechanischen Durchschlag auftreten, zu

berücksichtigen. Vornehmlich auf Druck beanspruchte Beinchen bewirken eine hohe Systemsteifigkeit, wogegen biegebeanspruchte Beinchen eine eher niedrige Systemsteifigkeit realisieren.

Zur Entwicklung von bistabilen Gasströmungswächtern sind messtechnische Untersuchungen der geeigneten Formgebungen sowie weiterführende experimentelle Entwicklungen notwendig. Die Materialbeanspruchung und die Betrachtung der Festigkeiten sind weitere Forschungsfelder, um ein sicheres Schließen über die Lebensdauer des Sicherheitsventils zu gewährleisten.

Durch die FEM-basierte, nicht-lineare Untersuchung des Kraft-Verschiebungs-Verhaltens nachgiebiger Durchschlagelemente für Gasströmungswächter wurde gezeigt, dass die Formgebung der Durchschlagelemente wesentlichen Einfluss auf die Systemsteifigkeit hat. Die für den mechanischen Durchschlag erforderliche Kraft (Schließkraft) ist durch die Formgebung der Durchschlagelemente einstellbar und kann tendenziell durch die mechanische Beanspruchung abgeschätzt werden. Damit trägt diese Untersuchung in besonderer Weise zur Entwicklung von bistabilen Gasströmungswächtern bei.

Literatur

- [1] Uhlig, R. und Zentner, L. „Ein Modell zur Dimensionierung nachgiebiger Elemente für den Einsatz in Gasströmungswächtern“. In: *Mechanismentechnik in Ilmenau, Budapest und Niš*. Hrsg. von Lena Zentner. Bd. 1. Universitätsverlag Ilmenau, 2012, S. 36–44.
- [2] Hartmann, L., Zentner, L. und Opfermann, R. „Analysis of supports of three-legged compliant snap-through structure for application in an excess flow valve“. In: *Shaping the Future by Engineering*. 58th Ilmenau Scientific Colloquium. Hrsg. von Peter Scharff und Christian Weber. Universitätsbibliothek Ilmenau, 2014. URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014iwk-049:1.
- [3] N.N. *Prüfgrundlage VP 305-1. Gasströmungswächter für die Gasinstallation*. Hrsg. von Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches. Technische Regel. Bonn, 2007.