

# ENTWICKLUNG EINES REGELKREISES ZUM ANFAHREN UND HALTEN VON POSITIONEN EINES KNICKSTABAKTUATORS BEI VERÄNDERLICHER BELASTUNG

S. Löser,  
Institut für Luft- und Raumfahrt TU-Berlin  
10587, Berlin  
Deutschland

## Zusammenfassung

Im Forschungsfeld adaptive Strukturen wird versucht, technische Lösungen für das Problem zu finden, die Verformungen einer Tragstruktur unter Belastung in sinnvoller Weise zu beeinflussen. Diese Fähigkeit kann beispielsweise bei Tragflügeln Anwendung finden, die sich ändernden Betriebsbedingungen in optimaler Weise anpassen, um einerseits den Widerstand zu minimieren oder die Struktur vor Überbelastung, z.B. aus Böenbelastung, durch gezielte aerodynamische Entlastung zu schützen. Zunächst richtet sich das Hauptaugenmerk auf die Entwicklung und Anwendung aktuierbarer Stabelemente, welche als Komponenten einer aeroelastisch aktuierbaren Flügeltragstruktur mit Stabwerkstopologie dienen konnten. Flexible, aktuierbare Strukturen sind grundsätzlich schwerer als auf maximale Steifigkeit ausgelegte Strukturen, da einerseits gegebene Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen nur in Form einer Kompromisslösung erfüllt werden können und andererseits zusätzliche Strukturelemente erforderlich werden. Sie können jedoch bei guter Auslegung gegenüber einem alternativen Strukturkonzept auf Basis expliziter mechanischer Gelenke durchaus auch leichter sein. Am Institut für Luft- und Raumfahrt ist deshalb ein neuartiges Aktuatorssystem auf der Basis von Knickstabelementen entwickelt worden. Dieses verwendet flache ausknickende Stäbe zur Lastaufnahme, die durch mit regelbarem Lufdruck erzeugte Seitenkräfte stabilisiert werden, um so gezielte Auslenkungen bzw. Kräfte generieren zu können. Das Systemverhalten ist hochgradig nichtlinear. Die erzeugte Kraft ist dabei funktional nichtlinear mit dem Lufdruck und der Weg nichtlinear mit der eingesetzten Luftmenge verbunden. Bei bestimmten Lastverhältnissen gibt es für einen Druck auch zwei Aktuatorpositionen, bei denen das System im Gleichgewicht steht. Daher ist das Einstellen einer vorgegebenen Position nur mit Hilfe eines Regelkreises möglich, der die aktuelle Position auf geeignete Weise misst und durch Regeln des Lufdrucks bzw. des Luftvolumen die gewünschte Aktuatorposition anfährt und hält.

## NOMENKLATUR

$e(t)$	Regelabweichung	[ - ]
$F$	Kraft	[ N ]
$F_{krit}$	Eulerknicklast	[ N ]
$h(t)$	Hubposition	[ mm ]
$K_p$	proportionaler Verstärkungsfaktor	[ - ]
$K_I$	integraler Verstärkungsfaktor	[ - ]
$K_D$	differentialer Verstärkungsfaktor	[ - ]
$l$	Länge	[ m ]
$p$	Druck	[ N/m <sup>2</sup> ]
$u(t)$	Stellgröße	[ - ]
$t$	Zeit	[ s ]
$w$	Durchbiegung	[ m ]

$w(t)$  Führungsgröße bzw. Sollgröße [ - ]

$y(t)$  Regelgröße bzw. Istwert [ - ]

## 1. EINLEITUNG

Im Verlauf der Entwicklung einer flexiblen und aktuierbaren Struktur wurde eine Stabwerkstopologie umgesetzt. Dieses Stabwerk ist als Kragbalken aufgebaut, um eine Flügeltragstruktur abzubilden. Durch ein Lastgeschirr wird an der Unterseite des Stabwerks eine statische Last über die Knotengelenke verteilt eingeleitet. Die daraus resultierende Kraftverteilung entspricht damit näherungsweise einer aerodynamischen Belastung. Infolge dieser Belastung stellt sich dadurch eine Biegeverformung ein. Um die derart verformte Tragstruktur zu beeinflussen, sind alle druckbelasteten Stäbe mit Knickstabaktuatoren ausgelegt worden. Durch gezieltes Ansteuern jedes einzelnen Aktuators sind somit bestimmte Auslenkungen bzw. Kräfte generierbar. Es ist somit möglich beispielsweise der Biegung entgegenzuwirken oder eine Torsionsbewegung zu erzeugen. Die damit einhergehende komplexe Kinematik infolge der Aktuierung des Stabwerks eröffnet einen

großen und in diesem Entwicklungsstadium schwer abschätzbarer Forschungsbereich. Einen ersten Schritt in diesem Bereich stellt die vorliegende Arbeit dar. In ihr werden Untersuchungen zum Anfahren und Halten bestimmter Positionen eines einzelnen Knickstabaktuators durchgeführt. Da das Stabwerk als Technologiedemonstrator zum Einsatz kommen soll, wird eine praktikable und innerhalb eines zeitlichen Rahmens und materiellen Aufwands sinnvolle technische Lösung angestrebt. Diese Lösung wiederum muss eine größtmögliche Flexibilität gegenüber ständigen Veränderungen und Anforderungen eines sich in der Entwicklung befindlichen Systems aufweisen. Mit Vorgabe dieser Randbedingungen ist die Entwicklung des prototypischen Regelkreises für einen Knickstabaktuator durchgeführt worden.

In der Arbeit wird die Entwicklung und Umsetzung des geregelten Knickstabaktuators dargestellt. Dabei wird als erstes die Notwendigkeit einer Regelung auf Basis der theoretischen Erkenntnisse bezüglich des systemdynamischen Verhaltens des Aktuators aufgezeigt. Unter Beachtung der Forderung nach einer praktikablen Lösung und Umsetzung werden entsprechende Regelungstechnische Methodiken vorgestellt und am Knickstabaktuator angewandt. Den Abschluss bildet die experimentelle Erprobung und Untersuchung des geregelten Aktuators.

## 2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN ZUR REGELUNG DES KNICKSTABAKTUATORS

### 2.1. Prinzip der Regelung

Das grundlegende Prinzip einer Regelung lässt sich am Standardregelkreis, der in BILD 1 dargestellt ist, erläutern.

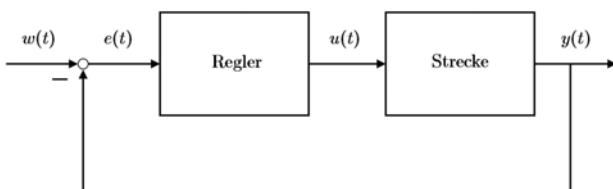


BILD 1. Prinzip der Regelung

Jeder Regelkreis besteht aus einer Vergleichsstelle, dem Regler und der Strecke bzw. Regelstrecke. An der Vergleichsstelle, in der die zu regelnde Größe, die sogenannte Regelgröße  $y(t)$ , von der Führungsgröße- oder auch Sollgröße  $w(t)$  abgezogen wird, entsteht die Regelabweichung

$$(1) \quad e(t) = w(t) - y(t).$$

Diese Regelabweichung entspricht einem Soll-Istwert-Vergleich und wird dem eigentlichen Regler übergeben. Aus der aktuellen Regelabweichung wird die Stellgröße  $u(t)$  im Regler berechnet, der die Strecke gezielt beeinflusst und auf die Strecke wirkt. Die Strecke umfasst hierbei alle Systemteile, die zwischen dem Ausgangssignal des Reglers  $u(t)$  und der interessierenden Regelgröße  $y(t)$  liegen. D.h. in der Strecke enthalten sind das Stellglied, welches das

leistungsarme Reglersignal in ein Signal umwandelt, mit dem die Regelstrecke angesteuert werden kann, sowie ein Messglied, mit dem die Regelgröße erfasst und in eine vom Regler verarbeitbare Form gebracht wird. Das wesentliche Merkmal der Regelung ist der geschlossene Wirkungskreislauf, der mit einer negativen Rückkopplung von Signalen arbeitet.

### 2.2. Aufgaben der Regelungstechnik

Die Regelungstechnik dient der zielgerichteten Veränderung eines Systems, um diesem bestimmte Eigenschaften aufzuprägen. Diese Eigenschaften lassen sich mit folgenden Grundforderungen formulieren:

- Stabilisierung: Das System muss stabil sein.
- Sollwertfolge bzw. Festwertregelung: Der Ausgang eines Systems entspricht genau einem vorgegebenen konstanten Sollwert. Dabei kann der Sollwert nach Abklingen eines Übergangsverhaltens erreicht werden. Dies wird durch eine Festwertregelung erreicht, wobei sich der Sollwert in der Zeit ändern kann. Diese Änderung muss hierbei so groß sein, dass das Übergangsverhalten bereits abgeklungen ist.
- Trajektorienfolge bzw. Folgeregler: Der Ausgang des Systems folgt genau vorgegebenen Sollwerttrajektorien. Diese Aufgabe können nur bestimmte Regler für eine Klasse von Sollwertsignalen (z.B. konstante Signale, sprungförmige Signale, rampenförmige Signale, sinusförmige Signale) erfüllen, da der Regler in Bezug auf diese Signale entworfen ist.
- Störunterdrückung: Der Ausgang (z.B. Hubstellung des Aktuators) soll von einer äußeren Störgröße (z.B. Lastwechsel) unbeeinflusst sein.
- Der Regelkreis muss robust gegenüber Parameterunsicherheiten und Totzeiten innerhalb der Regelstrecke sein.

Alle heutzutage benutzten linearen Regler haben ein Übertragungsverhalten, welches sich auf die drei idealisierten Grundtypen zurückführen lässt. Da es lineare Regler sind, können diese miteinander superponiert werden, um bestimmte Übertragungseigenschaften einzustellen.

- 1) Proportionaler (P-) Regler
- 2) Integrierender (I-) Regler
- 3) Differenzierender (D-) Regler

Wie oben erwähnt wurde, lassen sich diese drei Regler entsprechend miteinander kombinieren. Der PI-Regler arbeitet schnell und präzise, der P-Anteil fängt schnell die auftretende Regeldifferenz ab, und der I-Anteil beseitigt diese Differenz. Ein PD-Regler ist schneller als ein P- oder ein PI-Regler hat aber eine bleibende Regeldifferenz. Der PID-Regler vereinigt die Vorteile aller drei Reglertypen miteinander und lässt sich optimal an verschiedene Regelstrecken anpassen. Solch ein Regler ist schnell, fährt gezielt in die Nähe des Sollwerts, um abschließend die Regeldifferenz präzise auszuregeln.

### 2.3. Beschreibung der Regelstrecke

Bei dem zu regelnden System handelt es sich um ein neuartiges Aktuatorsystem auf der Basis von Knickstabelementen. Diese Aktuatoren sollen in einem weiteren Entwicklungsschritt innerhalb eines Stabwerks gezielt angesteuert und geregelt betrieben werden, um beispielsweise eine Verformung unter Belastung zu beeinflussen. Das BILD 2 zeigt das Prinzip der Anwendung des Aktuators beim Ausgleichen einer Biegeverformung unter Last.

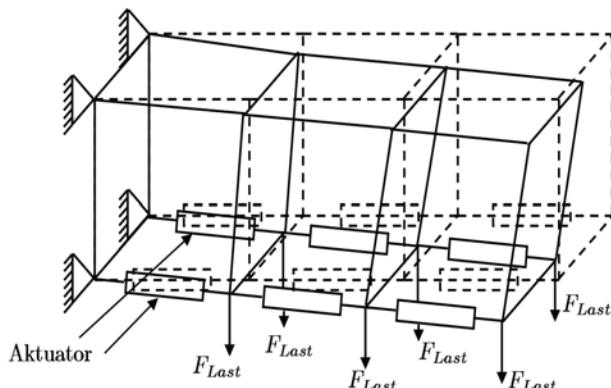


BILD 2. Stabwerk mit Aktuatoren

Der sogenannte Knickstabaktuator wird hierbei im Betrieb überkritisch (oberhalb der Eulerknicklast) axial auf Druck belastet. Durch Variation der Stabanzahl, der Geometrie oder des Materials ist es möglich, die Knicklast bzw. kritische Last  $F_{krit}$  gezielt einzustellen. Im belasteten Zustand werden die kreisförmig angeordneten Stäbe des Aktuators soweit nach innen eingeknickt, dass ein signifikanter Hub  $h$  erreicht wird. Durch einen geeigneten Anschlag wird verhindert, dass die Knickung w bis zum Festigkeitsversagen erfolgt. Die schlanken aus faserverstärktem Kunststoff gefertigten Stäbe sind dabei integraler Bestandteil der Struktur. Um eine Hubbewegung entgegen der Lastrichtung zu erzeugen, werden die Stäbe entgegen der Ausknickrichtung belastet. Die aufzubringende Querbelastung wird in dem Aktuator durch einen pneumatischen Druck realisiert. Dazu ist innerhalb der Stabanordnung ein abgeschlossenes Luftvolumen installiert. Das Luftpummen befindet sich in einem fest eingebauten Folienschlauch, in den das Fluid druckbeaufschlagt eingebracht wird. Damit wirkt der Stab im praktischen Einsatz bei überkritischer Belastung mit bis zur 1,3fachen kritischen Last (Eulerknicklast) der äußeren Last entgegen. Somit muss nur der verbleibende Teil der äußeren Last bei der Aktuierung gehoben werden. Der Knickstabaktuator ist damit insbesondere im Bereich knapp oberhalb der Knicklast sehr energieeffizient. Bei der Aktuierung wird dadurch die elastische Verformungsenergie zurückgewonnen, da sie nicht aus der Querkraft resultiert. Das BILD 3 zeigt den nichtlinearen, dimensionslosen Kraftverlauf  $F$  bezüglich der Knicklast  $F_{krit}$  gegenüber der Ausknickbewegung  $w(l/2)$  eines Stabelements der Länge  $l$ .

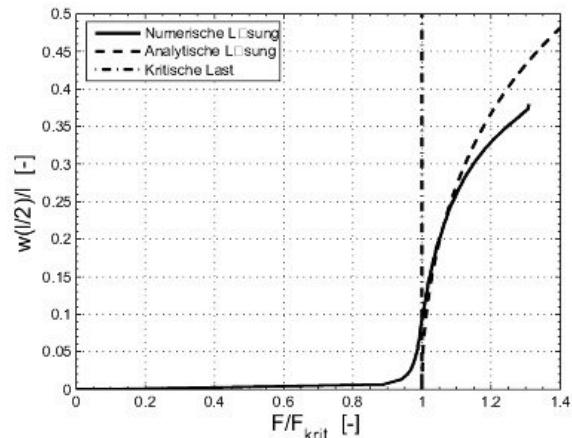


BILD 3. Dimensionsloser Kraftverlauf eines Knickstabes

Die Funktionsweise des Aktuators ermöglicht ein einfaches Reglungsprinzip, da nur die Hubbewegung  $h(t)$  (die Zeitabhängigkeit kennzeichnet im Folgenden immer die zu regelnden Größen) beeinflusst werden soll. Hierbei muss der Aktuator unter verschiedenen Belastungen eine Hubstellung halten oder verändern können. Diese Hubbewegung wird hierbei über eine Druckerhöhung bzw. -minderung innerhalb des abgeschlossenen Druckvolumens erzielt. Die Druckänderung erfolgt über ein ansteuerbares Ventil, dass an ein Druckreservoir angeschlossen ist. Die eigentliche Regelgröße ist hierbei der Volumenstrom der über das Ventil gesteuert wird. Der Druck kann als Regelgröße nicht benutzt werden, da es bei bestimmten Lastverhältnissen für einen Druck zwei Aktuatorpositionen gibt. Dies ist bei den ersten Untersuchungen [1], [2] des Aktuatorverhaltens durch Messungen und anhand von Berechnungen nachgewiesen worden. Das nachfolgende BILD 4 zeigt beispielhaft den statischen Druckverlauf einer Aktuatorkonfiguration bei unterschiedlicher Belastung.

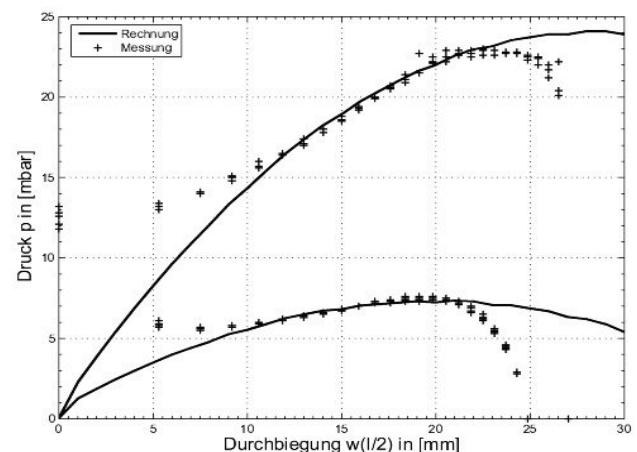


BILD 4. Druckverlauf bei verschiedenen Stabdurchbiegungen

Zur Bestimmung der genauen Position des Aktuatorhubs  $h(t)$  muss eine Sensorik vorgesehen werden. Der Sensor liefert hierbei den aktuellen Istwert, der an der

Vergleichsstelle mit der Soll-Vorgabe eine Abweichung ergibt. Diese Abweichung bzw. diesen Fehler verarbeitet der Regler und wird als Stellsignal an das Ventil übergeben. Das nachfolgende BILD 5 zeigt den prinzipiellen Aufbau des sich hieraus resultierenden Regelkreises.

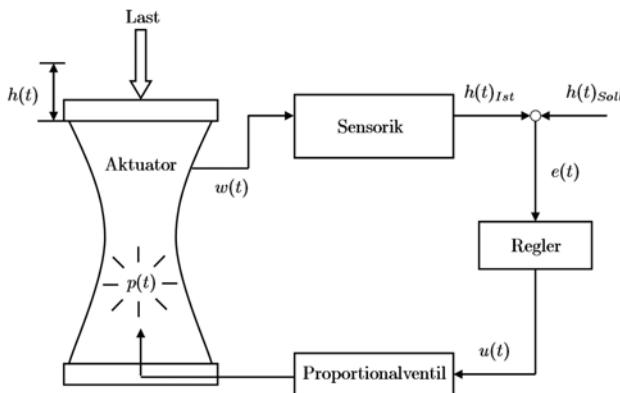


BILD 5. Regelkreis des Knickstabaktuators

#### 2.4. Analyse der Dynamik der Regelstrecke

Durch Zerlegen des Regelkreises [3] in seine einzelnen Komponenten ist eine abschätzende Charakterisierung der Regelstrecke vorzunehmen. Dabei werden die Komponenten Proportionalventil, Aktuator und Sensorik mit einem physikalischen Modell beschrieben, die die wesentlichen Eigenschaften wiedergeben. Es werden die Ausgangssignale der jeweiligen Komponenten analysiert, um eine erste Reglerauswahl zu treffen.

Aus den in der Analyse [2] der einzelnen Komponenten gewonnenen Erkenntnissen sind folgende Rückschlüsse bezüglich einer Reglerauswahl zu ziehen. Alle analysierten Streckenbestandteile weisen eine proportionale Charakteristik auf, welche bei Verwendung eines reinen P-Reglers eine bleibende Regelabweichung zur Folge hätte. Um diese Regelabweichung auf Null zurückzuführen, muss ein I-Anteil vorgesehen werden. Da mit dem D-Anteil vorsichtig umgegangen werden muss, wird er unter Beachtung seines Einflusses als regelungstechnische Lösung mit berücksichtigt. Damit ergibt sich für die Reglerstruktur ein PI-Regler oder ein PID-Regler. Der geschlossene Regelkreis ergibt sich durch Zusammenführung aller Komponenten. Formal erhält man das folgende Blockschaltbild (BILD 6).

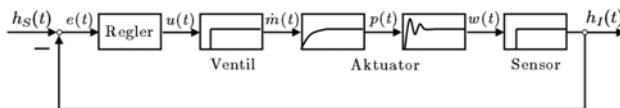


BILD 6. Blockschaltbild des entwickelten Regelkreises

Hierbei muss beachtet werden, dass die Aktuatorodynamik mit diesem Modell nur in unmittelbarer Umgebung eines Arbeitspunktes erfasst wird.

#### 2.5. Parametrierung des Reglers

Nach der Wahl der Reglerstruktur müssen die Reglerparameter unter bestimmten Forderungen an den Regelkreis festgelegt werden. Zu diesen Forderungen gehören:

- Die Stabilisierung des geschlossenen Regelkreises.
- Die Herstellung einer stationären Genauigkeit (keine bleibende Regelabweichung).
- Die Antwort auf einen Führungssprung soll genügend gedämpft sein. (kein starkes Über- oder Unterschwingen)
- Der Regelkreis soll hinreichend schnell sein, um eine neue Führunggröße schnell zu erreichen.
- Geringer Störgrößeneinfluss, der sich nur wenig auf die Regelgröße auswirkt.
- Der Regelkreis soll unempfindlich gegenüber Parameterschwankungen der Strecke sein. D.h. eine Alterung des Prozesses und damit eine Veränderung der Parameter der Regelstrecke sollte kein deutlich verändertes Verhalten des Regelkreises bewirken, und es darf insbesondere nicht zu einer Instabilität kommen.

Hier wird deutlich, dass sich die Forderungen widersprechen. Ein schneller Regelkreis ist unter Umständen nicht stark genug gedämpft, oder die Regelgröße soll der Führungsgröße folgen, aber nicht der Störgroße. Deshalb läuft die Parametrierung immer auf einen Kompromiss zwischen diesen unterschiedlichen Forderungen hinaus. Um hier ein schnelle und praktikable Lösung zu finden, gibt es die so genannten Einstellregeln.

Die verwendeten Einstellregeln [3], [4], [5] sind vor dem Hintergrund folgender Überlegungen ausgewählt worden. Die Regeln sind äußerst praxisnah und damit direkt auf den Aktuator anzuwenden. Die Einstellregeln dienen dabei als eine tendenziell einzuhaltende Richtlinie und den sich daraus ergebenen Erfahrungswerten. Der damit eingestellte Regelkreis des Aktuator zeichnet sich in Hinblick auf seine Anwendung in einem Stabwerk durch eine hohe Flexibilität im Sinne der angestrebten Regelungstechnischen Umsetzung aus.

- Empirische Einstellregeln:** In der Praxis werden die meisten Regelkreise durch Ausprobieren von Reglereinstellungen realisiert. Dabei werden der Proportional-, Integral- und Differentialanteil nach praktischen Erfahrungswerten vorgewählt und variiert. Dies ist mittels Nachoptimieren des Regelkreises anhand der Istwertverläufe durchzuführen. Diese Art der Einstellung eignet sich besonders für nicht allzu komplexe Regelkreise.
- Heuristische Einstellregeln:** Die heuristischen Einstellregeln sind systematische Verfahren, die der Festlegung der Reglerparameter dienen. Es müssen nur wenige Kennwerte der Regelstrecke bekannt sein, welche durch einfache Versuche bestimmt werden können. Aus diesen Kennwerten lassen sich mit Hilfe von Einstelltabelle die gesuchten Parameter berechnen. Die so gefundenen Parameter stellen jedoch kein Optimum dar und müssen meistens noch nachgestellt werden. D.h., entspricht das heuristische Ergebnis nicht den geforderten Regelverhalten, muss auf Basis dieses Ergebnisses der Regelkreis noch empirisch nachgestellt werden. Die verschiedenen Einstellregeln unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Grundannahmen und gelten nur für bestimmte Regelstreckentypen.

### 3. TECHNISCHE REALISIERUNG DES REGELKREISES

#### 3.1. Realisierungsformen

Der eigentliche Regler als Komponente innerhalb eines Regelkreises lässt sich als mechanisches oder elektronisches Element ausführen. Mechanische Regler sind konstruktiv mit erheblichem Aufwand verbunden, da sie immer an die Strecke individuell angepasst werden müssen. Damit einhergehend ist ein weiterer Nachteil die geringe Flexibilität bei Veränderung bzw. Erweiterung der Strecke. Der Vorteil ist die geringe Störanfälligkeit, weil in vielen Fällen keine Hilfsenergie benötigt wird, da die Energie direkt aus der Regelstrecke kommt. Mit einem elektronischen Regler hat man die Möglichkeit einer analogen oder einer digitalen Umsetzung. Beide sind mit der heutigen Rechnertechnik bezüglich der Signalverarbeitungsgeschwindigkeit als nahezu gleichwertig einzuschätzen. Zur Lösung einer Regelungsaufgabe mit einem analogen Regler wird heutzutage auf käufliche Komponenten zurückgegriffen. Dies sind dann kompakte Bausteine, die nur noch konfiguriert und an die Strecke angepasst werden müssen. Als Nachteil erweist sich die Störanfälligkeit und die Verzerrungen von Signalen, die durch die physikalischen Eigenschaften der Bauteile und Leitungen sowie durch kapazitive und induktive Kopplungen auftreten. Der digitale Aufbau einer Regelung kommt dagegen immer häufiger zum Einsatz. Wegen der hohen Integrierbarkeit der Bauteile, der besseren Signalqualität und des zum Teil geringeren Energieverbrauchs übernimmt die Digitaltechnik immer mehr Aufgaben und verdrängt die Analogtechnik zunehmend. Aufgrund leistungsfähiger Rechner und entsprechender Software ist man in der Lage, innerhalb einer Entwicklung die Regelungstechnik mit einigen Grundkenntnissen zweckentsprechend und problemorientiert einzusetzen. Hierbei kommt vor allem der Vorzug zum Tragen, dass ein Rechner eine Vielzahl von Aufgaben parallel bearbeiten kann. Zu diesen Aufgaben zählen die graphische Darstellung, die Aufbereitung und Archivierung von Daten sowie deren Weitergabe beispielsweise an übergeordnete Systeme. Zusätzlich ist das Anbinden von Messeinrichtungen (Sensorik) über Messkarten unproblematisch. In dieser Arbeit wird deshalb eine digitale Regelung aus folgenden Gründen verwendet. Der geregelte Aktuator befindet sich noch in der Entwicklung und stellt in dieser Form nur ein Grundprinzip dar. Dieses Prinzip soll erhalten bleiben und rechtfertigt damit eine Regelungslösung des Systems. Dennoch können im weiteren Entwicklungsverlauf Veränderungen auftreten, die sich noch nicht abschätzen lassen. Diese Veränderungen könnten den Druckaufbau oder die Sensorik betreffen. Der Druckaufbau lässt sich z.B. mit einer schnell arbeitenden Pumpe oder mit einem einfachen Wegeventil realisieren. Für die Sensorik wäre auch eine direkte Messung des Hubs vorstellbar. Deshalb soll mit einer schnellen und anpassungsfähigen rechnergestützten Regelung gearbeitet werden. Wie im vorigen Kapitel gezeigt wurde, setzt sich der Regelkreis aus dem Aktuator als zu regelndes System, dem Sensor, einem Ventil und dem eigentlichen Regler zusammen. Die prinzipielle Anordnung der einzelnen Elemente zeigt der in BILD 7 zu erkennende Aufbau. Als Schnittstelle zur Datenerfassung und Wandlung dient eine Messkarte, die direkt an den Rechner bzw. digitalen Regler angeschlossen ist. Am Proportionalventil steht über ein

Druckreservoir ein konstanter Überdruck an, der durch einen zwischengeschalteten Druckminderer eingestellt werden kann.

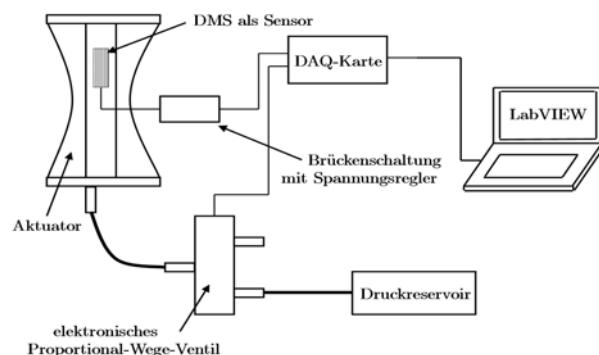


BILD 7. Technische Realisierung des Regelkreises

#### 3.2. Aufbau der Regelstrecke

##### 3.2.1. Proportionales Wege-Ventil

Pneumatische Wegeventile dienen als Steuerelement bzw. Stelleingriff in Systeme. Das Eingangssignal des Ventils kann dabei elektrischer, mechanischer oder pneumatischer Natur sein. Im Ventil wird dabei eine vom Eingangssignal abhängige Verengung eines Strömungsquerschnittes realisiert, wobei der Luftstrom durch Öffnen, Schließen oder Umleiten von Anschlässen gelenkt wird. Die Ventile unterscheiden sich in der Bauart der Querschnittsverengung, in der Art der Betätigung des Schieberlements und in der pneumatischen Funktion (Druck bzw. Massenstrom) des Ventils. Nach dem heutigen Stand der Technik sind Ventile, die die Anforderung des zu entwickelnden Regelkreises erfüllen, als kompakte Bauteile erhältlich.

Das eingesetzte Ventil kann analog über ein Spannungs- oder ein Stromsignal angesteuert werden. Das Eingangssignal wird dann in einen Massenstrom umgesetzt. In dem aufgebauten Regelkreis wird mit einem Spannungssignal gearbeitet, weil der DMS ebenfalls ein Spannungssignal liefert. Somit muss innerhalb des digitalen Regelalgorithmus nicht umgerechnet werden. Das in BILD 8 dargestellte Steuerungsprinzip ist sehr einfach.

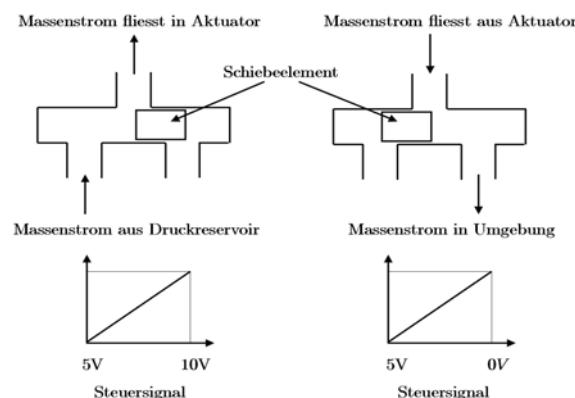


BILD 8. Steuerungsprinzip des Proportionalventils

Bekommt das Ventil als Signal 5Volt, ist es in beiden Richtungen geschlossen. Ist das Signal 0Volt oder 10Volt ist der Massenstromzufluss bzw. -abfluss maximal. Alle Zwischenstellungen sind kontinuierlich und äußerst präzise anzusteuern.

### 3.2.2. DMS-Sensor

Zur Bestimmung des Istwertes, also der Hubstellung des Aktuators, sind im ersten Kapitel schon elementare Vorüberlegungen aufgezeigt worden. Im Ergebnis zeigt sich, dass die Sensorik in Form eines Dehnmessstreifens (DMS) in den Regelkreis integrierbar ist. Der DMS-Sensor wird mit einem schnell härtenden Kleber mit dem Stab fest verbunden. Aus verschiedenen Versuchen resultieren folgende Erkenntnisse. Die Position des DMS muss auf der Zugseite des knickenden Stabes liegen. Da der DMS unter Druck schneller Schaden nimmt und das Messergebnis verfälscht, muss der DMS möglichst dicht in Richtung der Lagerung des Stabes positioniert werden, um unbeeinflusst von der Folie arbeiten zu können. Zusätzlich ist der DMS als Teil einer Brückenschaltung BILD 9 mit zwei festen und einem veränderlichen Widerstand auszuführen.

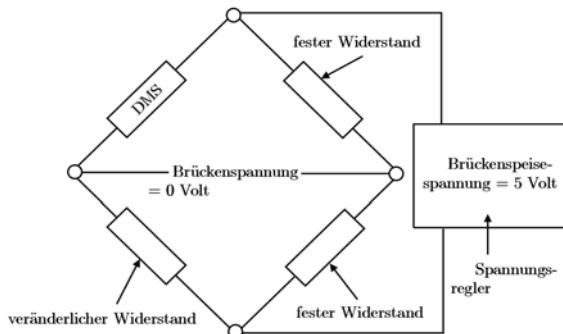


BILD 9. Brückenschaltung

Die festen Widerstände sind dabei in der Größenordnung des verwendeten DMS zu wählen. Durch den veränderlichen Widerstand lässt sich die Brückenspannung immer zu Null abgleichen. Dies bietet mehrere Vorteile. Zum einen kann ein konstanter Drift nach längerem Einsatz ausgeglichen werden, zum anderen ist die Einstellung eines Offsets jederzeit möglich, um z.B. eine ausgelenkte Lage als Nullposition zu definieren. Das größte Problem dieser Messmethode ist das Signalrauschen. Da nur sehr kleine Dehnungen im  $\mu\text{m}$ -Bereich gemessen werden, liegen die Spannungen auch im  $\mu\text{V}$ -Bereich. Wie im vorigen Abschnitt erwähnt wurde, rechnet der Regler mit Spannungswerten im Volt-Bereich. Dementsprechend muss das DMS-Signal verstärkt werden. Dadurch wird das Rauschen direkt mit verstärkt. Um hier ein möglichst rauscharmes Signal zu erhalten, muss das Signal gefiltert werden. Diese Filterung wird digital durchgeführt und ist in die Reglersoftware implementiert. Auf diese Problematik wird im nächsten Abschnitt detaillierter eingegangen. Zusätzlich ist der Vollbrücke noch ein Spannungsregler vorgeschaltet, der eine konstante Brückenspeisespannung von 5 Volt liefert. Damit können Stromschwankungen abgefangen werden, die sich noch zusätzlich als Messfehler über das vorhandene Rauschen legen.

### 3.2.3. Digitaler Regler

Der digitale Regler ist mit einem graphischen Programmiersystem [6] erstellt. Dieses Programm ist speziell auf Mess- und Automatisierungstechnik ausgelegt. Die eigentliche Programmierung erfolgt auf Basis einer graphischen Benutzeroberfläche nach dem Datenfluss-Modell. Durch diese Besonderheit eignet sich dieses Programm ideal zur Datenerfassung und -verarbeitung. Der programmierte PID-Algorithmus vereinigt alle Vorteile der konventionellen Regler, und es lassen sich sämtliche Reglerkonfigurationen durch Nullsetzen der Parameter bilden. Da ein Digitalrechner eine endliche Zeit für die Berechnung eines Regelgesetzes und für die Darstellung bzw. Ausgabe der Werte braucht, können die Messsignale nicht mehr kontinuierlich verarbeitet werden. Das Signal wird zeitdiskret mit einer vorgegebenen Schrittweite  $T$  durch Abtasten der Messung erfasst und verarbeitet. Die Berechnung des Reglersignals  $u(t)$  aus dem Fehler  $e(t)$  muss ebenfalls in diskreter Form erfolgen.

$$(2) \quad u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad \begin{matrix} P-\text{Anteil} \\ I-\text{Anteil} \\ D-\text{Anteil} \end{matrix}$$

Dabei wird das Integral durch eine Summe und der Differentialquotient durch einen Differenzenquotient ersetzt. Mit  $e_k = e(t = kT)$ ,  $e_{k-1} = e(t = (k-1)T)$  ergibt sich das diskrete Reglersignal für jeden Abtastschritt ( $k = \text{Samples}$ ).

$$(3) \quad u(t) = K_P e_k + K_I \sum_{i=0}^{k-1} e_i T + K_D \frac{e_k - e_{k-1}}{T} \quad \begin{matrix} P-\text{Anteil} \\ I-\text{Anteil} \\ D-\text{Anteil} \end{matrix}$$

Da die Signale des Sensors bzw. Ventils als Spannungswerte vorliegen, wird innerhalb des Algorithmus mit der Einheit Volt gerechnet. Somit muss die DMS-Spannung (Istwert in  $\mu\text{V}$ ) vor dem Eingang des Reglers digital mit dem Faktor 1000 umgerechnet werden. Am Ausgang des Reglers liegt dadurch das Steuersignal  $u(t)$  in der richtigen Größe für das Ventil vor. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass ein in dieser Form programmierte Regler ein beliebig großes Stellsignal berechnen kann. Dies führt bei einer großen Sollwertänderung zu einem entsprechend großen Fehler. Beim Einsatz solcher PID-Regler und anderer Regler mit I-Anteil muss deshalb beachtet werden, dass nachfolgende Stelleinrichtungen (Ventil) nur beschränkte Signalbereiche haben. Tritt während eines Ausregelvorgangs eine Sättigung des Stellglieds auf, so wird bei Vorliegen eines Regelfehlers der I-Anteil dennoch weiter aufintegriert, ohne dass ein anderes Stellsignal umgesetzt werden könnte. Kommt das Stellsignal nach einiger Zeit aus der Sättigung heraus, weil z.B. eine zunächst vorhandene Störung verschwindet, würde es sehr lange dauern, bis der aufgebaute I-Anteil so weit abgebaut wäre, dass ein annehmbares Regelverhalten erzielt würde. D.h. in der Praxis ist eine Sollwertänderung von Null auf den Maximalwert nicht direkt erreichbar, sondern nur durch langsames schrittweises Erhöhen möglich. Um den Sollwert des Hubs  $h_{Soll}(t)$  nicht durch Spannungen vorzugeben, wird der Istwert zusätzlich über eine Kalibrierungsfunktion in ein Längenmaß umgerechnet. Diese Funktion ist in dem Regelalgorithmus derart implementiert, dass eine Änderung jederzeit möglich ist.

Dies gilt auch für die Reglerparameter  $K_P$ ,  $K_I$  und  $K_D$ , die sich manuell jederzeit verändern lassen.

### 3.2.4. Messdatenerfassung der Regelstrecke

Die Wandlung der Signale von analog in digital und umgekehrt wird mit einer Messkarte, sogenannten DAQ-Karten (data acquisition), gewährleistet. Um das hochfrequente Messrauschen des DMS-Signals zu unterdrücken, wird ein digitaler Filter eingesetzt. Ein einfacher Tiefpassfilter, in diesem Fall Butterworth 2. Ordnung mit der Grenzfrequenz 5Hz, ist hierbei ausreichend. Ein Butterworthfilter ist ein kontinuierlicher Frequenzfilter, der so ausgelegt ist, dass die Frequenzen unterhalb der Grenzfrequenz ungehindert passieren können. Erst bei Erreichen dieser Grenzfrequenz werden die Frequenzen abgeschwächt. Dabei ist die 2. Ordnung ein Maß für die Stärke der Abschwächung. Mit der Wahl der Grenzfrequenz 5Hz werden alle störenden Rauschsignale ausreichend gefiltert, und die niederfrequente Dynamik der Regelstrecke bleibt unbeeinflusst. An dieser Stelle wirkt sich die hohe Flexibilität der digitalen Filtertechnik entscheidend aus. Die softwaretechnische Unterstützung erlaubt eine direkte Einstellung des gefilterten Signals, indem das Ausgangssignal in geglätteter Form dargestellt wird.

Da die DAQ-Karte mehrere analoge Ein- und Ausgänge besitzt, können zusätzliche Messgeräte angeschlossen werden, die nicht unmittelbar zum Regelkreis gehören. Von Interesse ist hierbei die Messung des Druckaufbaus innerhalb des geschlossenen Volumens und eine direkte Hubmessung. Beide Messungen interessieren in sofern, da sie Ergebnisse bezüglich der theoretisch getroffenen Annahmen liefern und zur Systemüberwachung beitragen.

Die Druckmessung wird mit einer Druckmessdose durchgeführt, die im Bereich von 0-1000mbar arbeitet. Neben der Maßeinheit ist auch der Nullpunkt einer Druckskala von Bedeutung. Die verwendete Messdose erfasst den Überdruck (auch effektiver Druck oder Relativdruck), der relativ zum atmosphärischen Druck (am Messort herrschender Druck) gemessen wird. Durch Anschließen an den Druckluftschlauch zwischen Aktuator und Ventil mittels eines T-Stücks bleibt der Regelkreis unbeeinflusst. Die Abzweigung befindet sich dabei möglichst dicht am Aktuator, damit der Druck im Schlauch ungefähr dem Druck im Aktuatorvolumen entspricht. Ein analoger Ausgang ermöglicht den angezeigten Wert über die DAQ-Karte zu erfassen.

Zum direkten Erfassen des Hubs wird ein Laserdistanzmessgerät eingesetzt. Dieses Messgerät arbeitet äußerst präzise, da die Hübe relativ groß sind und die Geschwindigkeit langsam ist. Somit tritt bei dieser Art der Messung kaum Rauschen auf. Zur Messung wird der Laserkopf, wie in BILD 10, genau in Hubrichtung ausgerichtet und fixiert.



BILD 10. Sensor für Laserdistanzmessung

Der Messbereich des Lasers ist 10mm und die Auflösung erfolgt über ein Spannungssignal von 10Volt. Die Hubbewegung des Aktuators entspricht diesem Messbereich. Somit wird die Nullstellung des Laserkopfes auf eine mittige Hubposition ausgerichtet. Die Messgenauigkeit ist innerhalb des Bereichs äußerst präzise. Bei Überschreitung des Bereichs liefert der Laser kein Signal mehr.

## 4. VERSUCHE UND ERGEBNISSE

In diesem Kapitel wird anhand einer speziellen Aktuatorkonfiguration die Methodik der praktischen Reglereinstellung beschrieben. Dazu wird am Anfang ein Abgleich zwischen den theoretischen Annahmen bezüglich des Systemverhaltens und den Messergebnissen vorgenommen. Des Weiteren werden die heuristischen Verfahren nach dem vorgegebenen Schema angewandt. Die damit erhaltenen Versuchsergebnisse werden ausgewertet und Regelungstechnisch beurteilt. Die somit gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage, um zum Schluss die Reglerparameter mit empirischen Methoden nachzustellen.

### 4.1. Versuchsdurchführung

Zur experimentellen Reglereinstellung des Aktuators ist ein Versuchsaufbau gewählt worden, der dem späteren Einsatzbereich innerhalb eines Stabwerks, möglichst nahe kommt. Dafür wird ein Versuchsaufbau (BILD 11) benötigt,

in dem der Aktuator unter Druckbelastung arbeitet und seine Regelaufgabe erfüllt.



BILD 11. Versuchsaufbau für Reglereinstellung

Um diesen Zustand abzubilden, befindet sich der Aktuator in einer Vorrichtung, bei der in axialer Richtung verschiedene Lasten aufgebracht werden können. Die Lasten sind statische Gewichte, die sich bis zu einer bestimmten Höhe und Masse über dem Aktuator stapeln lassen. Diese Art des Aufbaus hat wegen messbeeinflussenden Effekten Grenzen. Werden diese Grenzen überschritten, würden zusätzliche Schwingungen auftreten, und die Massen neigen zum Kippen.

Die untersuchten Aktuatorkonfigurationen entsprechen nach der Stabanzahl bzw. -anordnung und dem Durchmesser den im Stabwerk verbauten Aktuatoren. Da es experimentell wenig praktikabel ist, die gleichen Lasten wie im Stabwerk aufzubringen, wird durch Skalierung der Knicklast ein äquivalenter Zustand geschaffen. Dieser Zustand entspricht dem Einsatzbereich, d.h. die Last wird bis zum ca. 1,3fachen der Knicklast erhöht. Die Variation der Knicklast erfolgt durch Veränderung der Stabgeometrie, in diesem Fall durch Änderung der Stablänge. Durch schrittweises Erhöhen der Last und Verwendung verschiedener Stablängen lässt sich der Aktuator quantifizierend untersuchen. Durch Verwendung dieses einfachen Versuchsaufbaus sind messbeeinflussende Fehler schnell zu erkennen und entsprechend zu berücksichtigen. Darüber hinaus erlaubt der Aufbau, ein jederzeit reproduzierbares Ergebnis zu erzeugen.

Die Versuche wurden mit Aktuatoren durchgeführt, deren Stablängen verschieden sind. Die Versuchsergebnisse

waren ähnlich. Deshalb wird im Folgenden nur auf eine spezielle Aktuatorkonfiguration eingegangen.

Mit diesem Aktuator wird im weiteren Verlauf der Auswertung exemplarisch die Reglereinstellung vorgenommen. Als Erstes wird die Kalibrierung des Sensors vorgenommen. Dann wird der theoretisch vorhergesagte Einfluss der Regelparameter überprüft sowie auf den zusätzlich gemessenen Druckaufbau eingegangen. Im Zuge der Anwendung der heuristischen Einstellregeln wird zu Anfang der Schwingversuch durchgeführt. Die hieraus ermittelten Werte ergeben die gesuchten Reglerparameter der Einstellregeln. Durch Gegenüberstellung der Festwertregelung und der Folgeregelung werden die Ergebnisse entsprechend ausgewertet und beurteilt. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wird die Auswertung immer unter denselben Randbedingungen vorgenommen. D.h., es wird immer mit denselben Hubstellungen  $h(t)$  gearbeitet, die einer mittigen Hubposition entsprechen. Aus diesem Grund ist auch die sprungförmige Änderung des Hubs für jede Messung gleich. Um den Einsatzbereich abzubilden, werden die Lasten so gewählt, dass sie die obere und untere Grenze darstellen.

Die Einstellung des Knickstabaktuators erfolgt durch Anwendung der heuristischen Einstellregeln mit anschließendem Nachstellen der Reglerparameter. Dazu werden die kritischen Größen aus einem Schwingversuch bestimmt, um die Reglerparameter zu ermitteln. Da ein PI- oder PID-Regler in Frage kommt, werden beide Möglichkeiten untersucht. Hierbei wird die Festwertregelung und die Folgeregelung mit unterschiedlicher Lastbeaufschlagung jeweils miteinander verglichen und beurteilt. Resultierend aus diesen Erkenntnissen ist der Aktuator zum Schluss empirisch nachgestellt worden.

Auf der Basis der Reglerbewertung und durch Einstellen der heuristisch ermittelten Parameter lassen sich die Einflüsse hinreichend genau abschätzen. Die Ergebnisse zeigen, dass der D-Anteil weggelassen werden kann, da sich nur bei der Festwertregelung eine positive Auswirkung gezeigt hat. Dagegen ergab sich bei der Folgeregelung eine nicht gewollte Geschwindigkeitszunahme. Dieses Verhalten erweist sich als vorteilhaft für eine empirische Einstellung, da nur noch zwei Parameter angepasst werden müssen, von denen der Einfluss eindeutig vorhergesagt werden kann. Durch den P-Anteil wird die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht und die Amplitude des Überschwingers nimmt zu. Der I-Anteil regelt den verbleibenden Fehler zu null und verstärkt die Neigung zum zusätzlichen Überschwingen. Da die Reglereinstellung immer einen Kompromiss zwischen Festwertregelung und Folgeregelung darstellt, muss die Einstellung und das Ergebnis dementsprechend beurteilt werden. Gleichzeitig ist darauf zu achten, dass eine möglichst gleichmäßige Reaktion des Aktuatorhubs erreicht wird, um den Effekt des unterschiedlichen Druckaufbaus abzuschwächen.

Die Ergebnisse der Hubverläufe des geregelten Aktuator zeigen eine Kompromisslösung zwischen den beiden Regelaufgaben.

Bei der Sollwertfolge/Festwertregelung ist der Überschwinger ca. 0,5mm für die Last  $F$  (BILD 12) und ca. 1 mm bis 1,3mm für die Last  $3^* F$  (BILD 13).

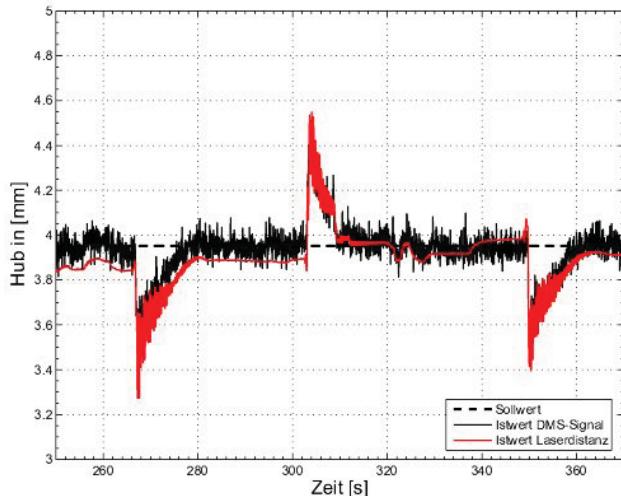


BILD 12. Sollwertfolge mit Last  $F$

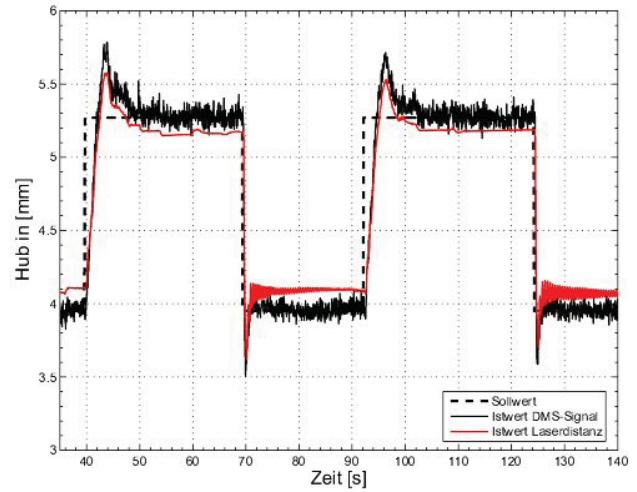


BILD 15. Folgeregelung mit Last  $3^* F$

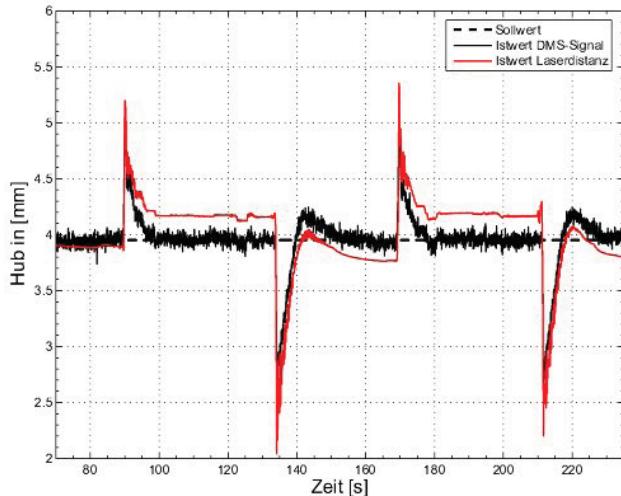


BILD 13. Sollwertfolge mit Last  $3^* F$

Bei der Folgeregelung ca. 0,5mm für die Last  $F$  (BILD 14) und 0,4mm für die Last  $3^* F$  (BILD 15).

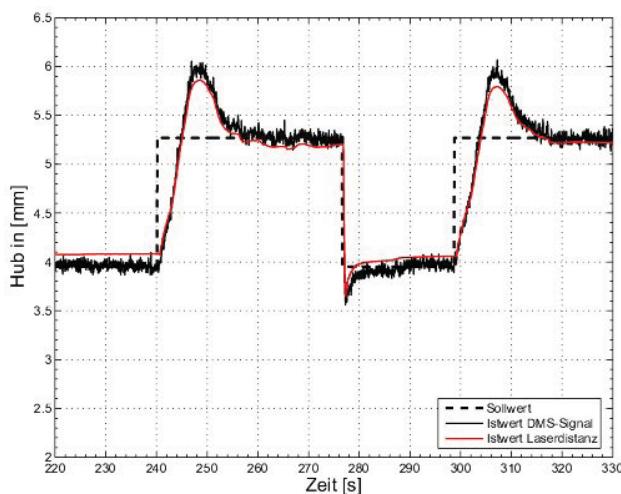


BILD 14. Folgeregelung mit Last  $F$

Damit sind beide Parameter im Hinblick auf eine robuste Einstellung sehr klein gewählt und als entsprechend konservativ einzuschätzen. Hier spricht man auch von einem Detunen der Parameter. Dies ist ein Vorgehen mit einem gewissen Grad an Vorsicht, das man zur Annäherung für die Lösung der späteren Stabwerksregelung anwenden sollte. Die somit bestimmten Werte können bei Verwendung des Regelkreises in dieser Form für alle Aktuatoren anfänglich übernommen werden. Ein minimales Nachstellen von einzelnen Aktuatorparametern des Stabwerks wird hinsichtlich der gegebenen Unsicherheiten noch nötig sein.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Gegenstand dieser Arbeit war die Entwicklung eines Regelkreises zum Anfahren und Halten von Positionen eines Knickstabaktuators bei veränderlicher Belastung. Hierbei sind wichtige Erfahrungen über das systemdynamische Verhalten gewonnen worden, die zu einem ingenieursmäßig und intuitiven Abschätzen von Einflussgrößen auf die Regelstrecke führen. Des Weiteren wurden Methodiken aufgezeigt, mit denen es möglich ist, den Aktuator in praktischer Weise schnell und sicher einzustellen. Dieses wurde immer im Hinblick auf eine spätere Nutzung innerhalb eines Stabwerks durchgeführt.

Am Anfang der Arbeit ist durch eine systemtheoretische Formulierung des Regelkreises eine abschätzende Bewertung des dynamischen Verhaltens vorgenommen worden. Aus diesen Erkenntnissen ist eine erste Reglerauswahl hervorgegangen. Zur schnellen Anpassung der Reglerparameter wird das methodische Vorgehen mit Hilfe der Einstellregeln vorgestellt und erläutert. Die einzeln analysierten Regelkreisbestandteile werden im Folgenden durch reale Bauteile umgesetzt und zum prototypischen Regelkreis aufgebaut. Die Einstellung des realen Regelkreises wird am Ende der Arbeit exemplarisch anhand einer bestimmten Aktuatorkonfiguration vorgenommen. Diese Konfiguration ist dabei so gewählt, dass sie den im Stabwerk Verwendeten entspricht. Die Versuche mit dem Knickstabaktuator zeigen, dass eine Regelung prinzipiell

möglich ist. Das Verhalten entspricht dabei den theoretischen Erkenntnissen der Regelungstechnik. Dadurch können Vorhersagen getroffen werden, die das System beherrschbar werden lassen. Als weiteres Ergebnis der Erprobungen zeigt sich, dass es zur Erfüllung der Regelaufgabe ausreicht, wenn ein Regler mit einem proportionalen und einem integralen Anteil zum Einsatz kommt. Daraus resultiert der Vorteil, dass nur noch zwei Parameter beeinflusst werden müssen, deren Wirkung aus den theoretischen Erkenntnissen und aus experimentellen Versuchen ausreichend bekannt sind.

Wie oben erwähnt müssen die gewonnenen Erkenntnisse immer im Zusammenhang mit der Umsetzung innerhalb eines Stabwerks gesehen werden. Aus den durchgeführten Versuchen mit dem Aktuator können somit folgende Rückschlüsse für die Weiterentwicklung des Stabwerks gezogen werden. Da es sich hier um ein in der Entwicklung befindliches System handelt, lassen sich weitere Vorgehensweisen mit den gewonnenen Erkenntnissen neu definieren und gleichzeitig für viele Bereiche eingrenzen. Bezogen auf die Vorgehensweisen muss als erstes die Entscheidung nach einer endgültigen Auswahl des Regelkreises getroffen werden. Wie in der Arbeit aufgezeigt können Regelkreiselemente ausgetauscht oder in einem gewissen Grad verändert werden, ohne dass sich das Regelprinzip verändert. Wird der in dieser Arbeit entwickelte Regelkreis verwendet, können die ermittelten Parameter direkt übernommen werden. Hierbei muss der erhebliche finanzielle Aufwand bei einer Verwendung der kostenintensiven Proportionalventile berücksichtigt werden. Damit steht eine schnelle, aber entsprechend teure Lösung zur Verfügung. Bei Benutzung anderer Regelkreiselemente, z.B. durch Einsatz anderer Ventilarten, ist die in dieser Arbeit dokumentierte Methodik noch mal analog durchzuführen. Diese Lösung ist wesentlich kostengünstiger, erfordert allerdings wieder einen entsprechenden entwicklungstechnischen Mehraufwand. Da die Sensorik als eine gute Lösung unter Berücksichtigung von Aufwand und Nutzen zu bewerten ist, muss die Entscheidung letztlich von der Wahl des Ventiltyps abhängig gemacht werden. Nach endgültiger Festlegung des Regelkreises schließt sich als nächster Schritt die Integration der Aktuatoren in das Stabwerk an.

Zusammenfassend können folgende Aussagen festgehalten werden. Das Konzept des Knickstabaktuators hat sich im Bezug auf eine Regelung bewährt. Insbesondere stellt der Einsatz eines Folienschlauchs zur Aufnahme des Druckluftvolumens eine unkomplizierte Lösung dar. Jeder Aktuator muss mit einem eigenen Regelkreis, wie in dieser Arbeit aufgezeigt wurde, ausgestattet sein. Idealerweise ist die Hardware als kompaktes Bauteil auszuführen, welches in den Aktuator integriert oder angebaut werden müsste. Somit sind nur noch Kabelverbindungen und Schlauchleitungen innerhalb des Stabwerks zu verlegen. Parallel dazu sollte die Sensorik und der digitale Regelalgorithmus aus dieser Arbeit in der weiteren Entwicklung Verwendung finden.

## 6. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] O. Mierheim: *Einsatz instabiler Strukturen zur Formadaption bei Tragflügeln*, Paper Document ID-81325, DGLR Kongress 2008
- [2] S. Löser: *Entwicklung eines Konzepts zur geregelten Stabilisierung geknickter Stabcluster zur Nutzung als Aktuator*, Studienarbeit, März 2007
- [3] R. King: *Regelungstechnik I*, Skript, Institut für Prozess- und Anlagentechnik TU-Berlin, 2006
- [4] R. Luckner: *Methoden der Regelung in der Luft und Raumfahrt*, Skript, Institut für Luft und Raumfahrt, TU-Berlin, 2005
- [5] H. Lutz, W. Wendt: *Taschenbuch der Regelungstechnik*, 3. Aufl. Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main, 2000
- [6] J. Rahman, A. Hagedstedt: *LabVIEW für Studenten*, 4. Aufl. Bercker Graph Betrieb, Keveler, 2004