

# **Mechatronischer Entwurf eines Bewegungssimulators mit pneumatischen Zugaktoren in Hexapod-Struktur**

***Michael Pohl***

*Fachhochschule Bochum, Fachbereich Mechatronik und Maschinenbau,  
Lennerhofstr. 140, D-44801 Bochum, Germany Phone: +(49)234/32-  
10430, Fax: +(49)234/32-10472, E-mail: michael.pohl@fh-bochum.de*

## **Zusammenfassung**

Es wird der Mechatronische Entwurfsprozesses eines pneumatischen Bewegungssitzes dargestellt. Der verwendete Fluid Muskel der Firma Festo AG ermöglicht sticklip freie Bewegungen und wird erstmals in einer hexapodischen Zuanordnung als weg- und druckgeregelter Pneumatikaktor eingesetzt. Durch die Sech-sachsstruktur ist es möglich, eine Person im Sitz in je drei translatorische und ro-tatorische Achsen zu bewegen, was einer Beweglichkeit in 6 Freiheitsgraden gleichkommt. Der Entwicklungsprozess wird unterstützt durch das 3D CAD Tool SolidEdge von Unigraphics. Hiermit wird einmal die mechanische Ausgestaltung der Sitzgeometrie erarbeitet, zum anderen liefert die Software die notwendigen Daten für die Mehrkörpersimulation in CAMEL-View von iXtronics. Mit CA-MeL-View werden Bewegungsraum, Dynamik, maximale Aktorbelastung und Stabilität des Sitzes vorab simuliert und angepasst. Die Systemdynamik der Fluidmuskeln wird auf einem gesonderten Prüfstand getestet und in das Mehrkör-permodell eingebaut. Ein modulares Prozesscontrollersystem in 80586 Technologie von BECK-IPC wird zur Regelung des Systems eingesetzt. Zur Programmerstellung wird die Regelungsstruktur blockorientiert grafisch erstellt gefolgt von einer automatischen ANSI C++ Codeerzeugung und Compilierung. Die zu den Aktoren parallel angebrachten Linearpotentiometer liefern die Istlänge zur Lage-regelung. Schnelle Druckregelventile setzen die Reglerstellgrößen in Druck – und damit Weginformation um. Die Nutzung der Hexapod-Rücktransformations-algorithmen läßt nur eine reine Steuerung der Bewegungssitzlage zu. Es ist ge-plant, den Hexapod-Hintransformationsalgorithmus zu implementieren, um die Messwerte für die Sitzlage im Prozess zur Verbesserung der Regelgenauigkeit zu verwenden. Die Entwicklung des Bewegungssimulators wird von der Festo AG gefördert und zeigt ein interessantes Beispiel für den Einsatz der Fluid Muskeln.

## **Schlüsselwörter**

Pneumatischer Membranaktor, Hexapodstruktur, Bewegungssitz, Mechatronischer Entwurf, Mehrkörpersimulation, Autocodegenerierung

## 1 Motivation zum Entwurf des Bewegungssitzes

Der Aufbau von mehrachsigen Bewegungssimulatoren mit pneumatischen Aktoren - im Gegensatz zu hydraulischen Lösungen - ist selten zu finden und geprägt von schwer beherrschbarer Dynamik [HKF00]. Der Vorteil des umweltfreundlichen Arbeitsmediums Druckluft wird aufgezehrt von Nachteilen wie Stickslip-Effekten und Nichtlinearitäten durch Kompressibilität im Pneumatikzylinder und dadurch bedingtem hohen Regelaufwand [S83]. Ein Ausweg ist die Auslegung recht grosser Zylinder, damit die Kräfte der bewegten Massen ein Drittel der verfügbaren Kolbenkraft nicht überschreiten [S98]. Die hier beschriebene Arbeit zeigt die Verwendung eines alternativen Pneumatikaktors, der bei kleiner Baugrösse hohe Kräfte aufbringt und somit die beschriebenen Vorteile in der Dynamik bringt. Unter moderaten Genauigkeitsanforderungen läßt sich so eine zufriedenstellende und elegante Antriebslösung finden.

### 1.1 Der Fluidmuskel

Die Fluidmuskeln MAS10, MAS20 und MAS40 der Festo AG, Esslingen sind Membran-Aktoren, welche abhängig von Druck und Einspannlänge eine Zugkraft aufbringen können [F04]. Bei gleicher Maximalkraft haben sie ein Achtel des Durchmessers eines Zylinderaktors. Sie können sich jedoch nur bis zu 25% der Nennlänge kontrahieren, während die Zugkraft  $F$  mit der Kontraktion  $h$  nichtlinear abnimmt (Abbildung 1). Daher wird als üblicher Einsatz das Heben von schweren Massen beschrieben.

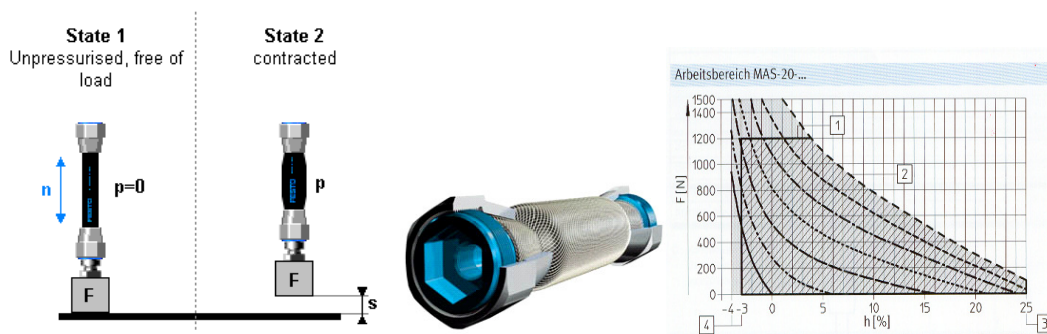


Abbildung 1: Standard-Anwendungsfall für Fluidmuskel, Schnittbild und Kennfeld

Als entscheidender Vorteil für die Positionsregelung gilt das Nichtvorhandensein jeglicher bewegter Dichtungen, weshalb keine Stickslip-Reibung auftritt. Der sinnvolle Einsatz ist jedoch auf Antriebsfälle mit reiner Zugkraft sowie kleinen Hüben im Verhältnis zur Muskellänge beschränkt.

Nach der Erfahrung früherer Arbeiten mit hexapodischen Aktoranordnungen schien der Fluidmuskel ideal für den Aufbau eines hängend befestigten Simulationssitzes zu sein. In Hexapod-Anordnung können sechs Fluidmuskeln drei Dreh- sowie drei Verschiebefreiheitsgrade unabhängig voneinander steuern. Eine entsprechende

mathematische Rücktransformationsvorschrift war aus [HFK00] verfügbar und konnte für die Aufhängungsgeometrie parametrisiert werden. Für dieses Projekt wurde die Festo AG als Partner gewonnen; das definierte Entwicklungsziel war eine Musteranwendung des MAS20 zu Demonstrationszwecken.

## 2 Der Mechatronische Entwurfsprozess

Der beschriebene mechatronische Entwurf gemäß [GL01] wurde nach Festlegung der Produktidee und des groben Konzepts in folgenden Schritten seriell aber auch iterativ durchgeführt: mit Hilfe der Konstruktionsumgebung SolidEdge wurde ein räumliches Modell konstruiert[S04]. In der integrierten Entwicklungsumgebung CAMEL-View [MN03] konnte ein recht detailliertes dynamisches Mehrkörpersimulationsmodell mit Animation erstellt werden. Ein Aktorprüfstand lieferte statische und dynamische Aktordaten. Nicht zuletzt folgte softwareunterstützter Reglerentwurf und dessen Programmierung.

### 2.1 Testaufbau der Sitzaufhängung zwecks Grobkonzept

Um eine funktionsfähige Struktur für die hexapodische Aufhängung des Sitzes zu finden, wurde ein einfacher Prototyp von Rahmen und Sitzträger aufgebaut und zunächst die Muskeln MAS10-350 eingesetzt. Darin konnten die Aktoren in unterschiedlichen Befestigungspunkten und Winkelanordnungen angebracht werden [DeGiorgio, 2003]. So wurde eine Konfiguration gefunden, in der die Sitzaufhängung trotz der Muskelelastizität sehr stabil und die Auswirkung der Aktoren auf die Sitzbewegung am effektivsten ist. Bei diesem Vorgehen zeigte sich besonders, dass das Sitzenerlebnis am Prototyp in der Entwicklungsphase nicht durch Animation und Simulationsergebnisse ersetzbar ist. Ein weiteres Ergebnis war die Erkenntnis, dass die mittleren Zugkräfte mit 200N für den MAS10 zu hoch waren, weshalb für die spätere Konstruktion der MAS20-350 gewählt wurde.

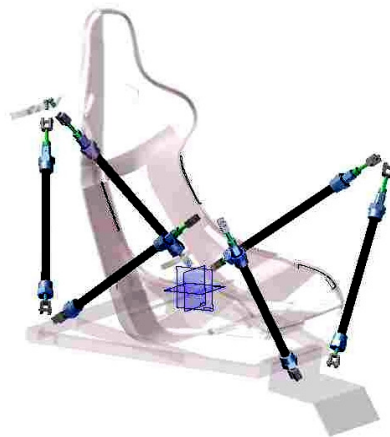


Abbildung 2: Sitz-Prototyp und resultierende Aktoranordnung in Hexapodstruktur

## 2.2 3D Konstruktion von Rahmen und Sitzträger in SolidEdge

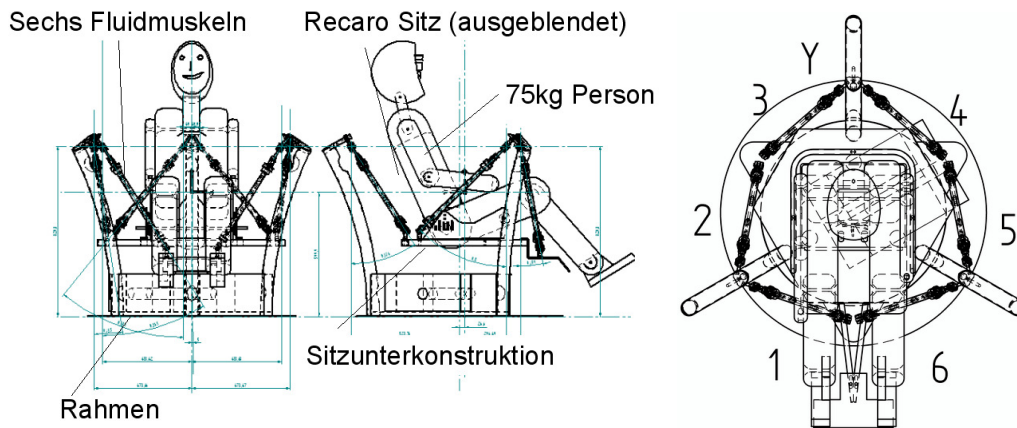


Abbildung 3 : CAD- Modell von Sitzbefestigung und Rahmen

Als CAD-System wurde SolidEdge gewählt, weil hierfür bereits Schnittstellen zu CAMEL-View erarbeitet wurden. Der Fahrzeugschalensitz Pole Position von Fa. Recaro wurde wegen guter Seitenführung ausgewählt. Um minimale Größe und Gewicht der bewegten Teile zu erhalten, wurde die Unterkonstruktion eng an die Sitzdimension angepasst. Hierbei war die Bereitstellung des CAD-Datensatzes seitens Recaro sehr hilfreich. Die Sitzposition ist innerhalb der Sitzschienenadapter leicht nach hinten geneigt und enthält eine Beinunterlage. Die sechs Aktoren wurden auf Rahmen- und Sitzgestellseite mittels Gabelköpfen und Kugelgelenkköpfen spielfrei jeweils in 3 Freiheitsgraden gelagert.

Hauptfunktion des Rahmens ist die stabile Befestigung der sechs Fluidmuskeln an drei Punkten in Brusthöhe des Sitzes. Um die Elastizität dieser Aufhängungspunkte gering zu halten, wurden starke bogengewalzte Stahlrohre an den Ecken eines Dreieck-Gehäuses befestigt. Das Gehäuse bilden 3mm-Laserschnittbleche, die an den Kanten durch Rechteckverzahnung und Schweissnähte sehr formstabil verbunden sind. Aus optischen Gründen wurden lackierte Verblendebleche aus Aluminium aufgesetzt. Eine weitere Aufgabe des Rahmens ist die Unterbringung von Elektrischer Installation, Prozesscontroller und Pneumatikventilen. Hierfür sind Montageöffnungen und Halter in dem Korpus eingebracht; für die Elektroinstallation wurde eine 19"-Rackschublade integriert, welche freien Zugang zur Installation und zum Controllersystem ermöglicht. Die Druck- und Sensoranbindung an die Aktoren wurde durch die Rahmenrohre verdeckt verlegt. Die Aktoreinheit bestehend aus Fluidmuskel, Druckanschluss, Gabelköpfen und Wegsensor/Adapter ist in sechs identischen Einheiten aufgebaut. Die Unterbringung eines Wegmesssystems im Muskel war nicht möglich, daher wurde ein schlankes Linearpotentiometer an die beiden Anschlussarmaturen befestigt [S05].



Abbildung 4: Fluidmuskel MAS20 Schraubversion mit externem Wegsensor

### 2.3 Multidomain-Modellierung in CAMEL-View

Die CAD-Konstruktion sollte nun durch umfangreiche Kollisionsuntersuchungen abgesichert werden; dazu gehörte neben der reinen geometrischen Berechnung der möglichen Sitzbewegung auch die Berechnung der statischen Aktorkräfte, welche den Aktorhub neben dem Druck mitbestimmt. Mit dieser Aufgabe war das CAD-System überfordert. Insbesondere die Berechnung der sich ergebenden statischen Kräfte in der hexapodischen Aufhängung gestaltete sich als sehr unhandlich. Daher wurde entschieden, die Untersuchungen nach Erstellung eines Mehrkörper-simulationsmodells in CAMEL-View durchzuführen. Die CAD-Daten konnten als VMRL-Grafikdaten direkt in den Modellaufbau in CAMEL-View integriert werden. Die Struktur der Verbindung der Körper Sitz, Rahmen und der sechs Aktoren zeigt

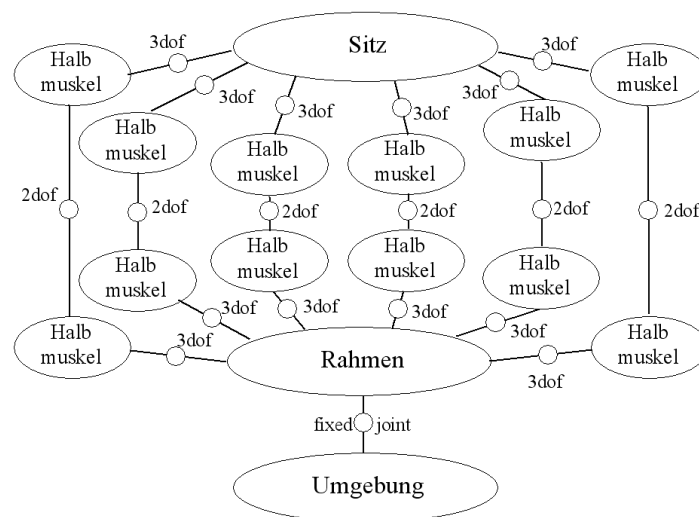


Abbildung 5: Modell Struktur mit Starrkörpern und Gelenken

Ähnlich der Strukturübersicht gestaltet sich auch der Aufbau des CAMEL-View Modells in der ersten Hierarchieebene. An Gestell und Sitz sind die sechs identischen Module der Fluidmuskeln angekoppelt. Neben diesem Mehrkörperanteil wird das Modell um die mathematisch/regelungstechnischen Elemente Bewe-

gungsvorgabe, Umrechnung in Aktorbewegung mittels Hexapod-Rücktransformationsalgorithmus sowie Aktorpositionsregelung ergänzt.

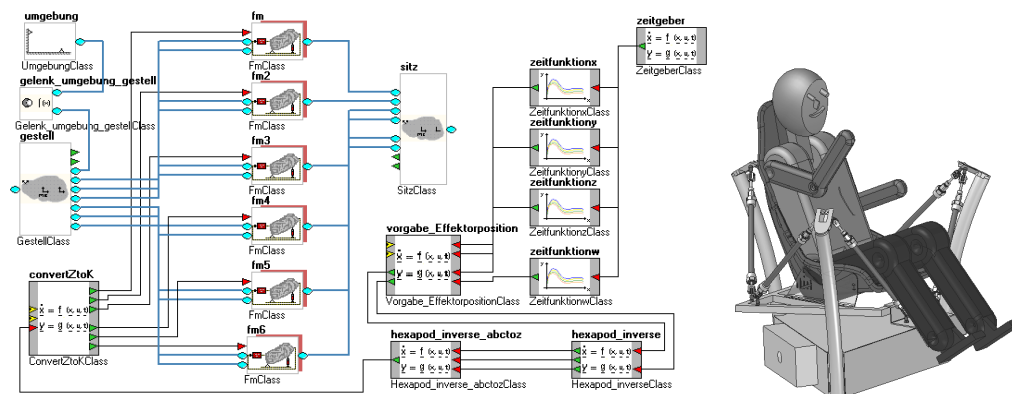


Abbildung 6: Modell-Struktur mit Starrkörpern und Gelenken sowie Animation

Die Fluidmuskeln wurden aufgrund der Kontraktionseigenschaft, d.h. wegen der Bewegung der Ankopplungspunkte in Achsrichtung, in ein oberes und unteres System aufgeteilt.

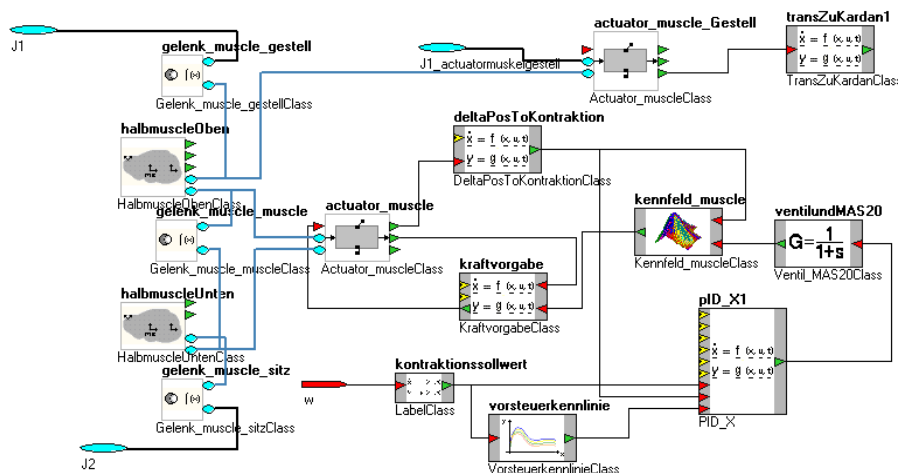


Abbildung 7: Modell-Struktur des Modul Fluidmuskel

Die Struktur des Modul enthält dementsprechend zwei Starrkörper (halbmuscleOben, halbmuscleUnten) und drei Gelenke, sowie die etwas umfangreichere statische Berechnung der erzeugten Kraft aus dem Ventildruck und der im Gelenk auftretenden Relativverschiebung in z-Achsrichtung.

Die sehr realistische Bewegungsanimation des Sitzes ermöglicht dem Modellentwickler wichtige Plausibilitätsuntersuchungen und wurde ausserdem zur Kollisionkontrolle genutzt. Bei der Auslegung der Regler liefert die Analyseumgebung simulierte Zeitverläufe von Kraft und Kontraktion aller sechs Aktoren. Bei der Vorgabe eines rampenförmigen Hubes sowie einer Drehung um die Hochachse ist sehr schön die Arbeitsweise der Hexapodstruktur zu erkennen.

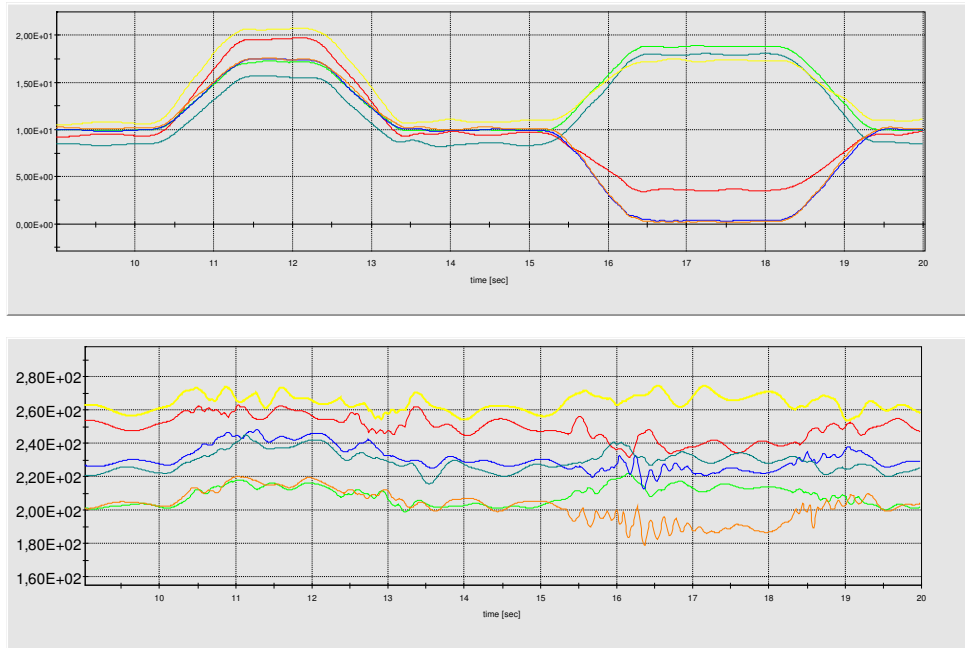


Abbildung 8: Alle sechs Muskeln, Kontraktion  $h$  in % (oben), Kräfte in N (unten)

### 3 Prozesscontroller und Softwareerstellung

Die Kriterien zur Auswahl des Controllers werden bestimmt von einer hohen Rechenleistung in Floatingpointmodus, Modularität und genügend ADC und DAC Schnittstellen. Aufgaben sind die Berechnung von sechs pneumatischen Lageregelkreisen inklusive der Rücktransformationalgorithmen der Hexapodanordnung sowie Kommunikation zur Sollwertvorgabe. Das eingesetzte modulare System PS-1 von Beck-IPC mit 80586CPU und Schnittstellenmodulen ist sehr kompakt, wird in C++ unter DOS 6.22 programmiert und realisiert Zykluszeiten von 1msec. Der Programmcode wurde mittels automatischer ANSI-C Codeerzeugung aus WINFACT6 [K04] erzeugt. Zu diesem Zweck wurde für den Autocodegenerator eine Beschreibungsdatei erstellt, die das PS-1 Rahmenprogramm sowie die schnittstellenspezifischen Codesegmente enthält. Der Algorithmus zur inversen Hexapodtransformation wird beim Compilieren als DLL dazugelinkt. Auf diese Weise kann die sehr übersichtliche blockorientierte Strukturdarstellung in WINFACT6 zur vorherigen Simulation oder sofortigen Programmerstellung genutzt

Die Kriterien zur Auswahl des Controllers werden bestimmt von einer hohen Rechenleistung in Floatingpointmodus, Modularität und genügend ADC und DAC Schnittstellen. Aufgaben sind die Berechnung von sechs pneumatischen Lageregelkreisen inklusive der Rücktransformationalgorithmen der Hexapodanordnung sowie Kommunikation zur Sollwertvorgabe. Das eingesetzte modulare System PS-1 von Beck-IPC mit 80586CPU und Schnittstellenmodulen ist sehr kompakt, wird in C++ unter DOS 6.22 programmiert und realisiert Zykluszeiten von 1msec. Der Programmcode wurde mittels automatischer ANSI-C Codeerzeugung aus WINFACT6 [K04] erzeugt. Zu diesem Zweck wurde für den Autocodegenerator eine Beschreibungsdatei erstellt, die das PS-1 Rahmenprogramm sowie die schnittstellenspezifischen Codesegmente enthält. Der Algorithmus zur inversen Hexapodtransformation wird beim Compilieren als DLL dazugelinkt. Auf diese Weise kann die sehr übersichtliche blockorientierte Strukturdarstellung in WINFACT6 zur vorherigen Simulation oder sofortigen Programmerstellung genutzt



Abbildung 9: PS-1 System Modulträger (586CPU, Supply, 2x4DAC, 8ADC)

werden. Dabei besteht Zugriff auf alle WINFACT6-Strukturblöcke und besonders die Hierarchisierung bringt bei sechs Regelkreisen grosse Zeitersparnis [S05].

## 4 Aktorvermessung und Reglerentwicklung

Zur Bewertung der dynamischen Eigenschaften des eingesetzten Druckregelventil Typ Festo MPPE3-3-1/2 und des MAS-20 wurde ein Lastprüfstand mit Drucksensorik eingerichtet, mit dem die Druckfrequenzgänge von Ventil und Ventil/Aktor vermessen wurden. Eine anschliessende Modellapproximation lieferte beim Ventil ein System 3. Ordnung mit einer Bandbreite nur bis  $\omega_E = 0.1 \text{ rad/sec}$  sowie für die Kombination Ventil/Muskel ein System 7. Ordnung mit gleicher Bandbreite und ausgeprägter Resonanz im Bereich 32rad/sec (Abbildung 11 ). Die Modelle wurden Grundlage für die Realisierung des Aktors im CAMEL-View-Modell.



Abbildung 10: Prüfstand für MAS-20

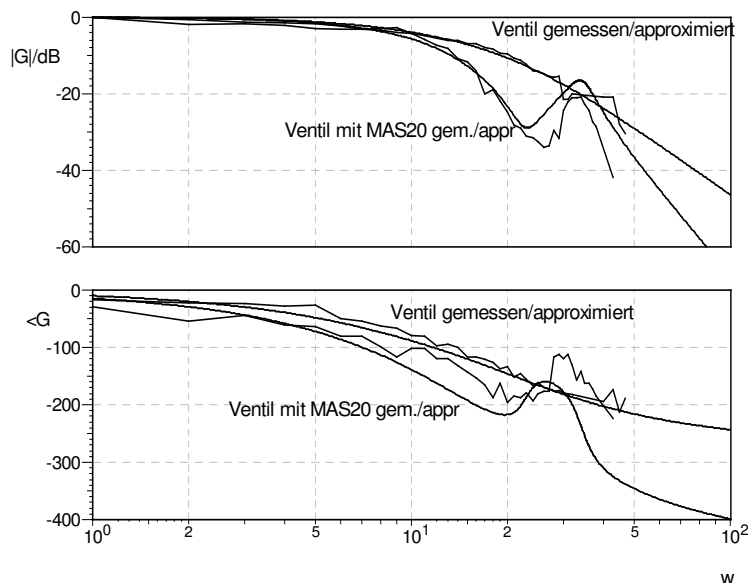


Abbildung 11: Frequenzgänge Ventilspannung->Druck mit/ohne MAS-20

Um genauere statische Werte zu erhalten, wurde auch das Kennfeld  $F(p,s)$  des Aktors bei Lasten bis 350N statisch vermessen. Aufgrund der darin ausgedrückten Nichtlinearität des Aktors wurde für den Regler eine kennlinienbasierte Vorsteuerung gewählt. Aus dem Sollwert für die Aktorlänge wird der bei Nennlast (=200N, vgl. Abb.9 unten) notwendige Druck errechnet und als Ventilvorgabe ausgegeben. Um die Abweichungen vom statischen Lastwert zu berücksichtigen, wurde der Längenmesswert zum Soll/Istvergleich genutzt und über einen PI-



Regler auf den Ventilwert aufgeschlagen. Es zeigt sich am Prüfstand, dass die Ventildynamik durch die Vorsteuerung erheblich verbessert wird und sich ein gleichmäßiges Antwortverhalten mit 0.3sec Anregelzeit ergibt.

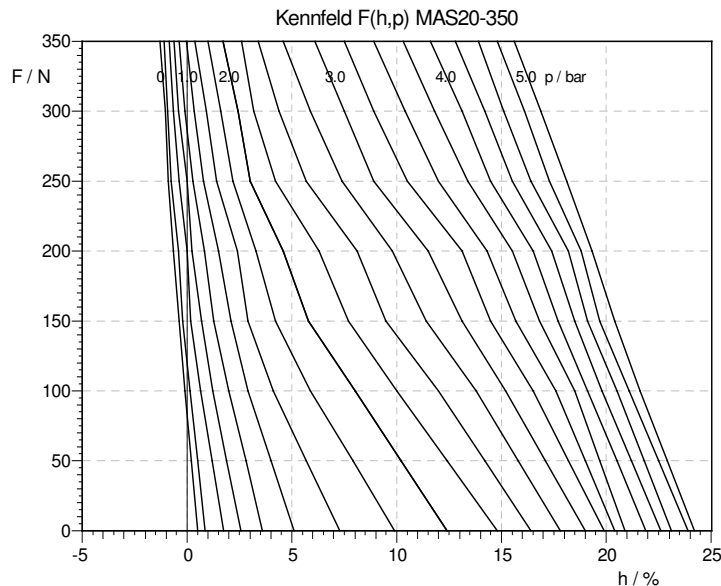


Abbildung 12: Kennfeld MAS20,  $F$ : Zugkraft,  $h$ : Kontraktion, bei 0-6 bar

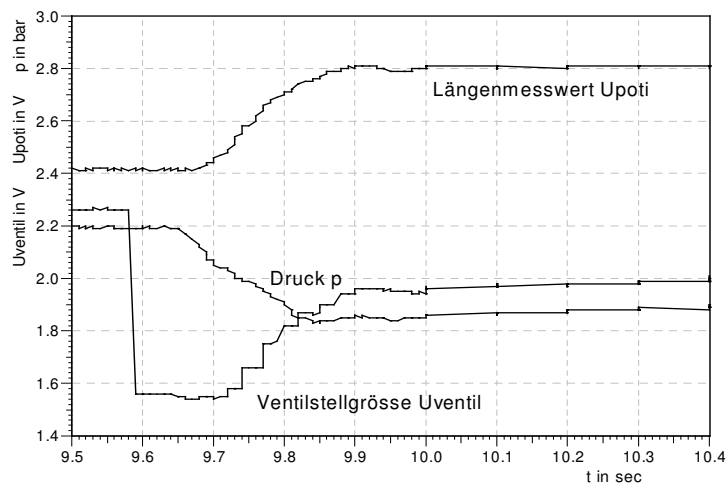


Abbildung 13: Längensollwertsprung für MAS-20 im Prüfstand mit 20Kg Last

## 5 Bewertung

Der Einsatz einer integrierten Multidomain Entwicklungsumgebung hat sich bei diesem Entwurf als notwendig erwiesen. Trotz einiger noch vorhandener Unzulänglichkeiten in der Verkettung der Entwicklungstools ergibt sich doch ein recht gutes Entwicklungsergebnis; das motiviert zu einer noch besseren Verkettung zwischen CAD-, MKS- und HIL-Systemen. Die Methode der Autocode-Generierung hat u.a. im Hinblick auf die komplexen Transformationen der

Hexapodstruktur einen erheblichen Zeitgewinn gebracht. Der Fluidmuskel entpuppt sich als interessante Antriebsalternative für die Automatisierungstechnik; mit einem schnelleren Ventil und dem Einsatz von Positionsmesstechnik ist er für sehr dynamische Antriebe geeignet. Weitere Arbeiten werden sich der Integration eines Modulbaukasten Pneumatik in CAMEL-View sowie der Codierung einer iterativen Hexapod-Vorwärtstransformation [HKF00] widmen, um die Sitzposition direkt regeln zu können.

Dank geht an die Firmen Festo AG, Esslingen und iXtronics GmbH, Paderborn für die intensive Unterstützung des Projektes.



## Literatur

- [DeG03] V. DeGiorgio, Konstruktion und experimentelle Inbetriebnahme eines Bewegungssimulators auf Basis fluidischer Muskeln, Diplomarbeit am Labor SRT, FH Bochum 2003.
- [F04] Info 501, Fluidic Muscle MAS, Festo Informationsschrift, 2004/03.
- [GL01] J. Gausemeier und Lückel, Entwicklungsumgebungen Mechatronik. HNI-Verlagsschriftenreihe ISBN 3-931466-79-5, 2001
- [HKF00] H.Hahn, W. Klier, D. Fürst, Mathematical modeling of spatial servo-pneumatic parallel robots, RTS Bericht 33, University of Kassel, 2000.
- [K04] J. Kahlert, Simulation technischer Systeme, Eine beispielorientierte Einführung, Vieweg 2004.
- [MN03] U. Meier-Noe, Modellierung mechatronischer Systeme - Basis der Systemauslegung und der Wissenskonservierung, VDI-Fortschrittsberichte Reihe 20 Nr. 279. 2003
- [P05] M.Pohl, A motion seat using pneumatic membran actuators in a hexapod system structur, Beitrag REM Annecy, France, 2005
- [S83] R.Schwenzer, Entwurf und Auslegung servopneumatischer Antriebsregelungen, Doktorarbeit an der RWTH Aachen, 1983
- [S98] K.Sikora, Entwicklung und Integration einer pneumatisch bewegten „Motion Platform“ in eine „Cave for Automated Virtual Environment“, Diplomarbeit am Labor SRT, FH Bochum sowie GMD, St.Augustin, 1998
- [S04] G. Sondermann, Fertigungsgerechte Konstruktion eines pneumatischen Simulationssitzes mit Fluidmuskeln in Hexapodanordnung, Diplomarbeit am Labor SRT, FH Bochum 2004
- [S05] M. Schenzer, Inbetriebnahme eines Bewegungssimulators auf Basis fluidischer Muskeln, Diplomarbeit am Labor SRT, FH Bochum 2005