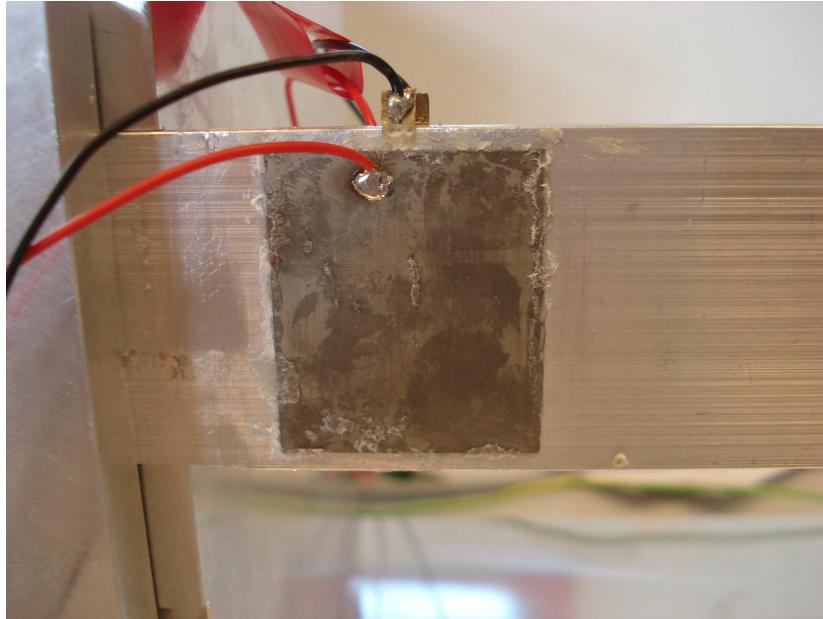


# Smart structures

**High performance, light weight structures**



**Zaal C, 3mE**

**Tim Hooijdonk & Riny Vermue**

**June 11, 2007**

1

# Aanleiding tot onderzoek



June 11, 2007

2

# Aanleiding tot onderzoek



June 11, 2007

3

# Introductie

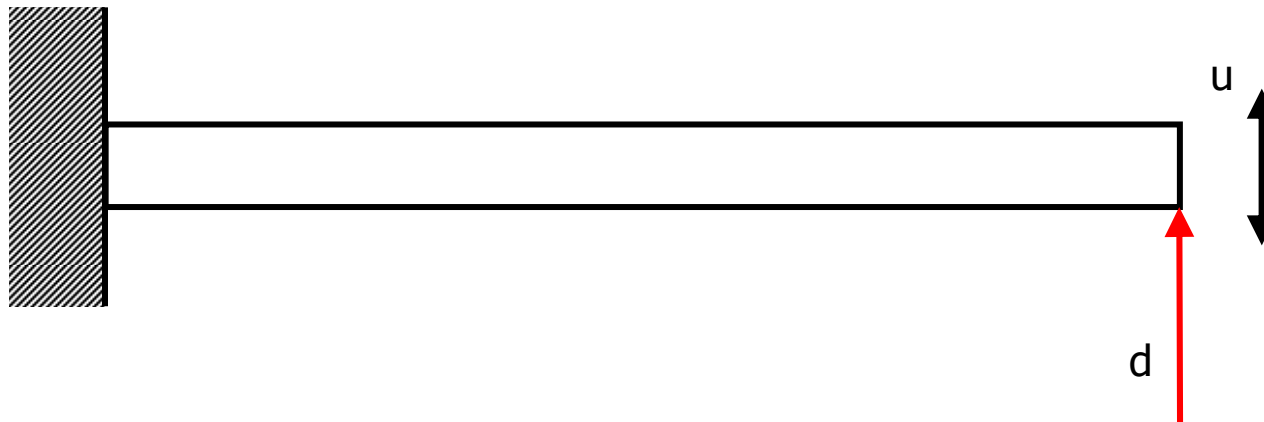
- Light weight structures wenselijk
  - materiaalprijzen
  - duurzaamheid
  - brandstofverbruik
  - transport
- **Probleem:** light weight structures gevoeliger voor verstoringen.
- **Oplossing:** actieve regeling?



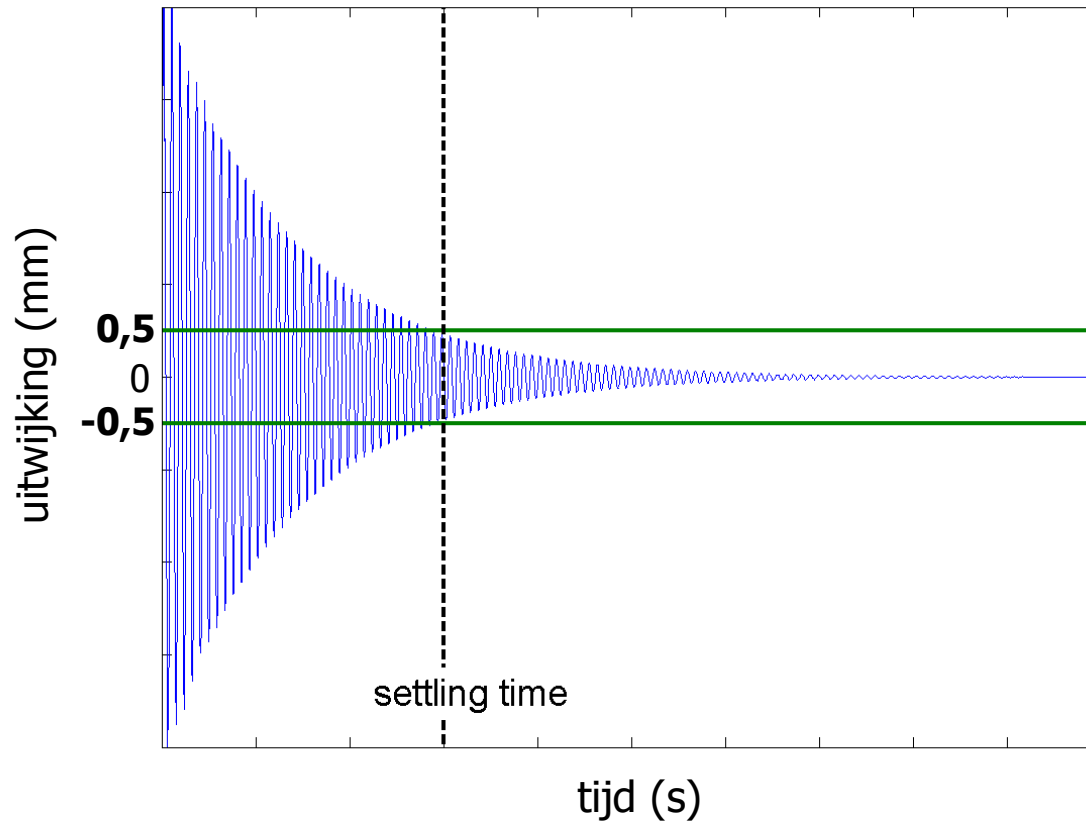
# Model

- Model voor dit onderzoek: ingeklemde aluminium balk.
- Performance (bestendigheid tegen trillingen) gelijk, maar minder materiaalgebruik.
- Performance maat model: settling time.

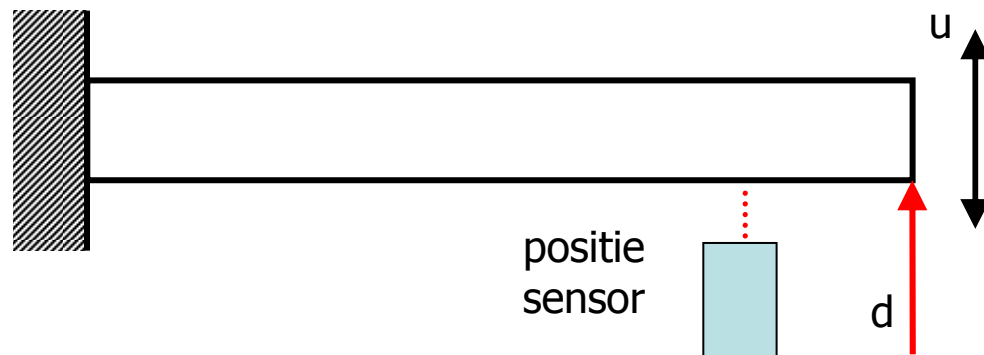
bovenaanzicht



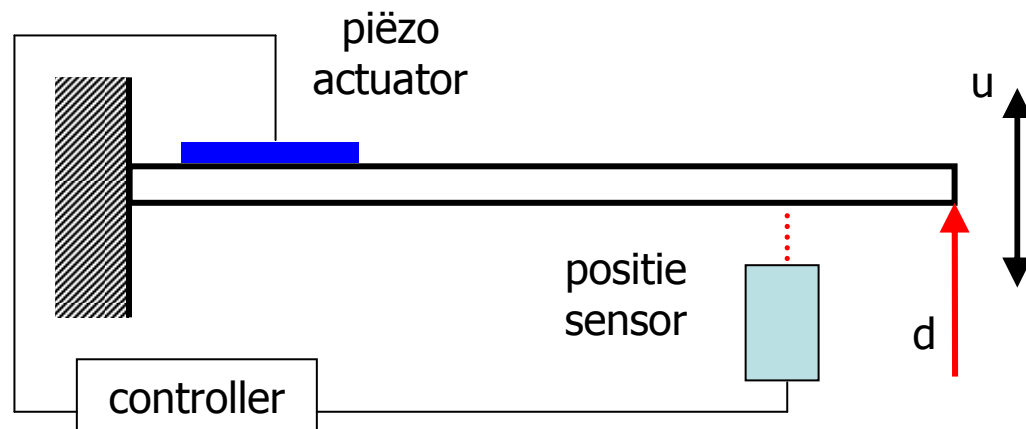
# Model - settling time



# Model - oplosstrategieën



passieve regeling  
(robuust)



actieve regeling  
(smart)

# Hypothese

Een actief geregelde ingeklemde aluminium balk van 800 x 40 x 3 millimeter heeft dezelfde settling time (6,4 seconden) als een passief geregelde ingeklemde aluminium balk van 800 x 40 x 11 millimeter.

**Actieve regeling:** de dynamische eigenschappen (stijfheid en demping) van een balk worden vergroot door het gebruik van een controller.

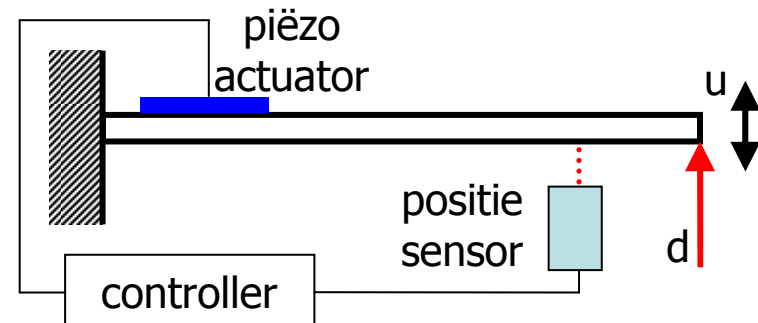
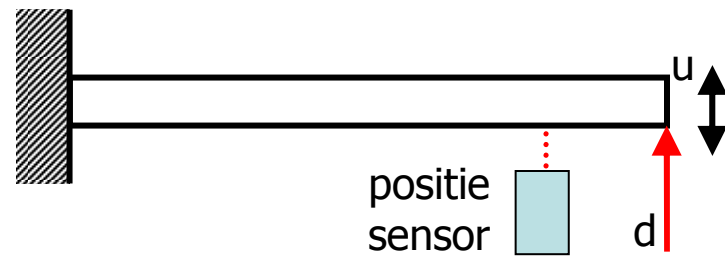
**Passieve regeling:** de dynamische eigenschappen (stijfheid en demping) van een balk worden vergroot door een balk dikker te maken.

**Settling time:** de tijd waarin een initiële kracht verstoring wordt gereduceerd tot een afwijking van 0,5 millimeter van de evenwichtspositie op de plaats van de positie sensor.



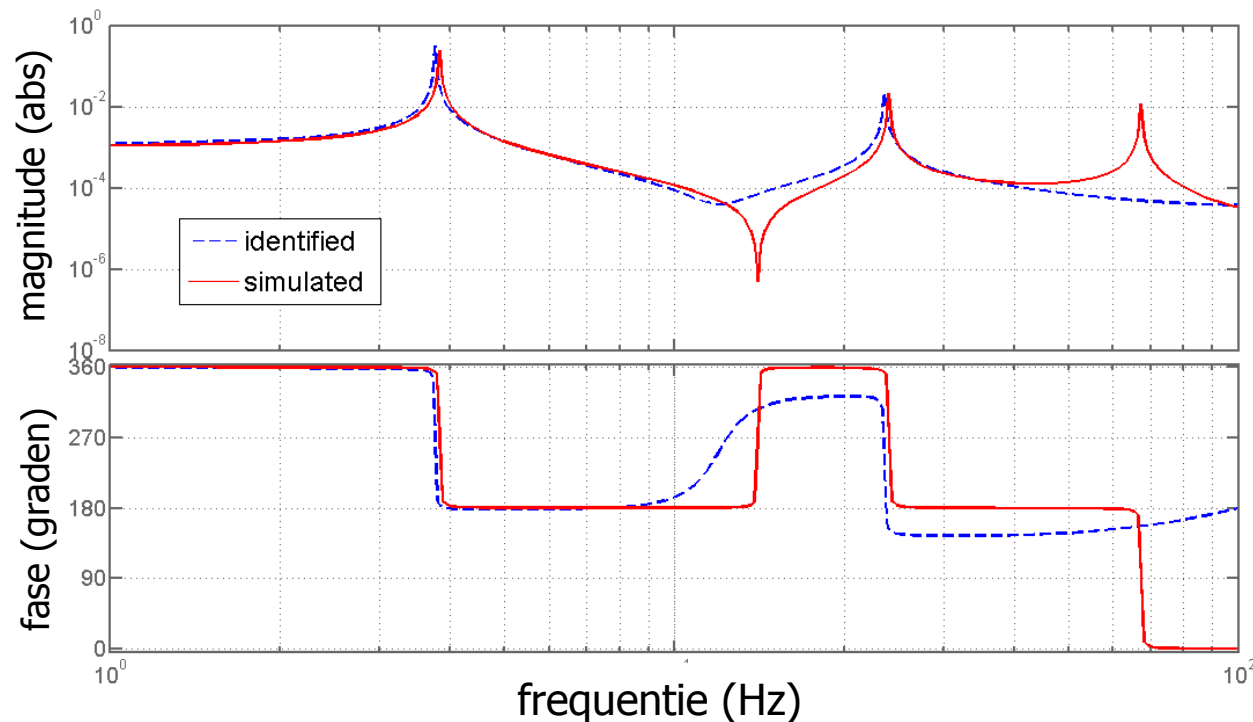
# Methode – opzet

- Lorenz (kracht) actuator
- Positie sensor
- Piëzo actuator
- Controller

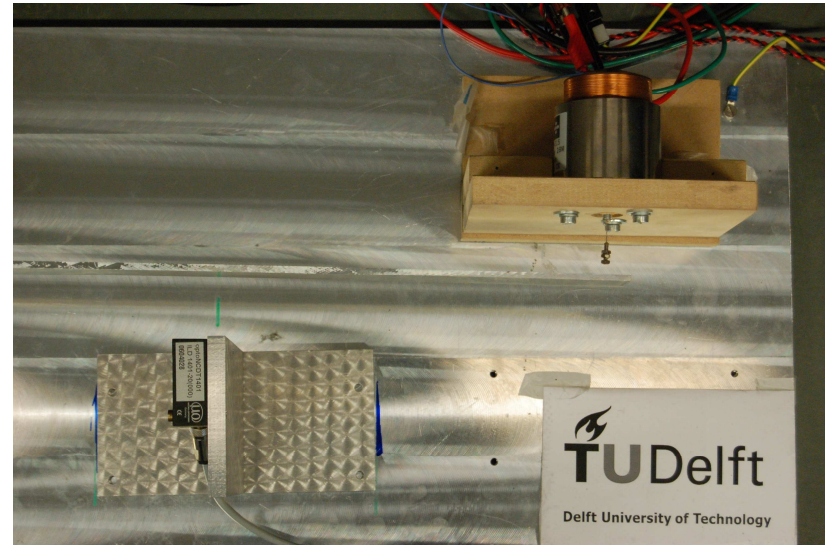
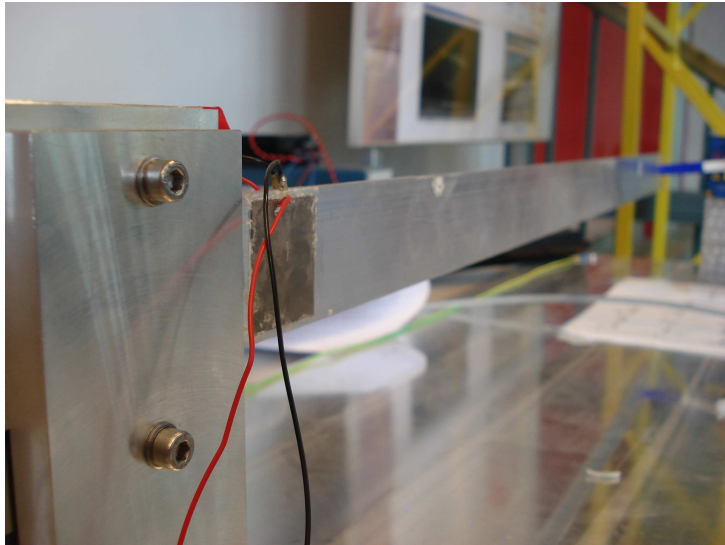


# Methode – systeemidentificatie

- Witte ruis signaal (bandbreedte 0-80 Hz).
- Werkelijke systeem versus simulatiemodel.



# Methode – proefopstelling



June 11, 2007

11

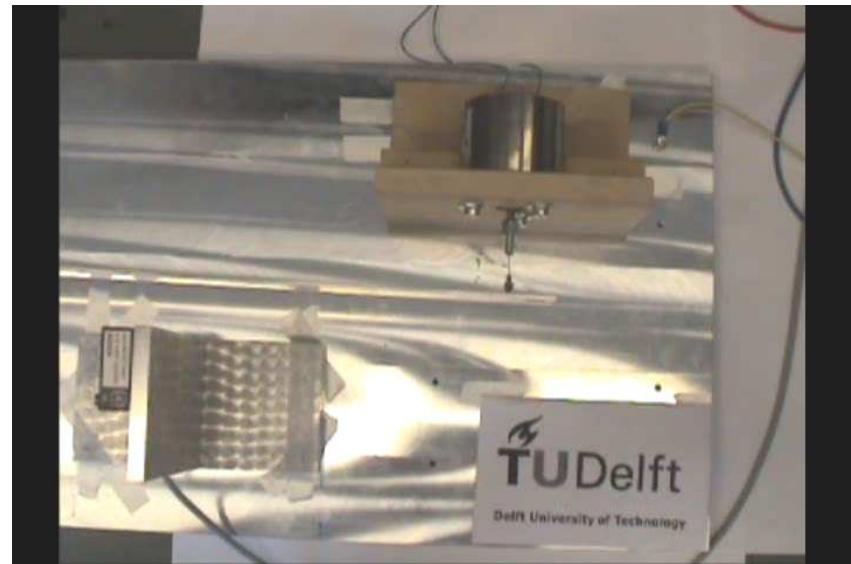
# Experimenten - controller

Balk met dikte 3 millimeter.

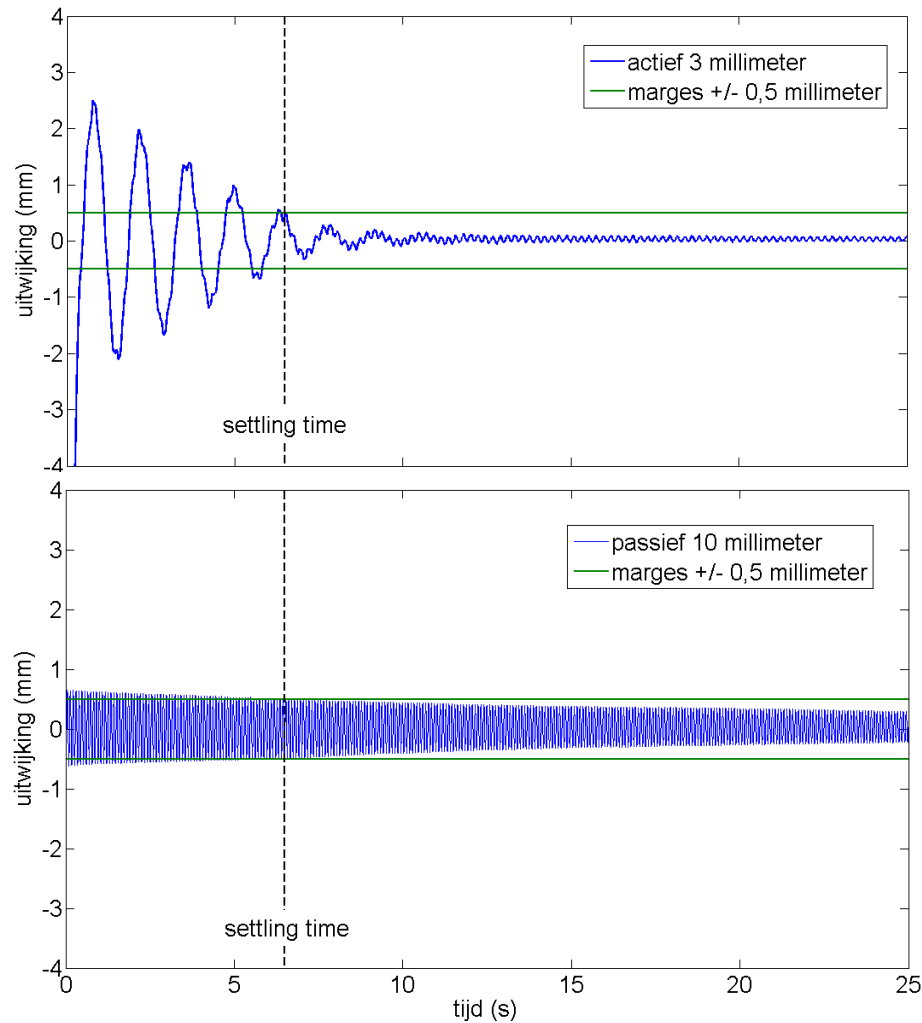
Passief:



Actief:



# Experimenten - resultaten



actieve regeling  
(dikte **3** mm)

passieve regeling  
(dikte **10** mm)

# Conclusie

Een actief geregelde ingeklemde aluminium balk van 800 x 40 x 3 millimeter heeft dezelfde settling time (6,5 seconden) als een passief geregelde ingeklemde aluminium balk van 800 x 40 x 10 millimeter.

Dikte balk bij passieve regeling? 10 millimeter.

Dikte balk bij actieve regeling? 3 millimeter.

## **Conclusie:**

**70% minder materiaalgebruik**

Echter:

Wel andere materialen en kosten: sensor, actuator, controller.

# Aanbevelingen

- Het effect van het gebruik van meer piëzo actuatoren.
- Actieve regeling bij complexere systemen.
- Het actief regelen bij continue verstoringen.

# Smart structures?



**Zaal C, 3mE**

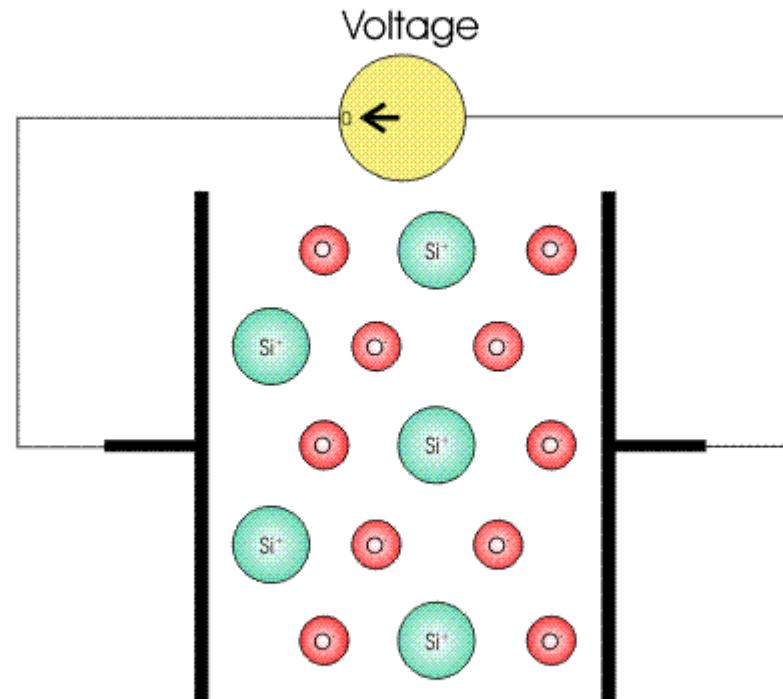
**Tim Hooijdonk & Riny Vermue**

**June 11, 2007**

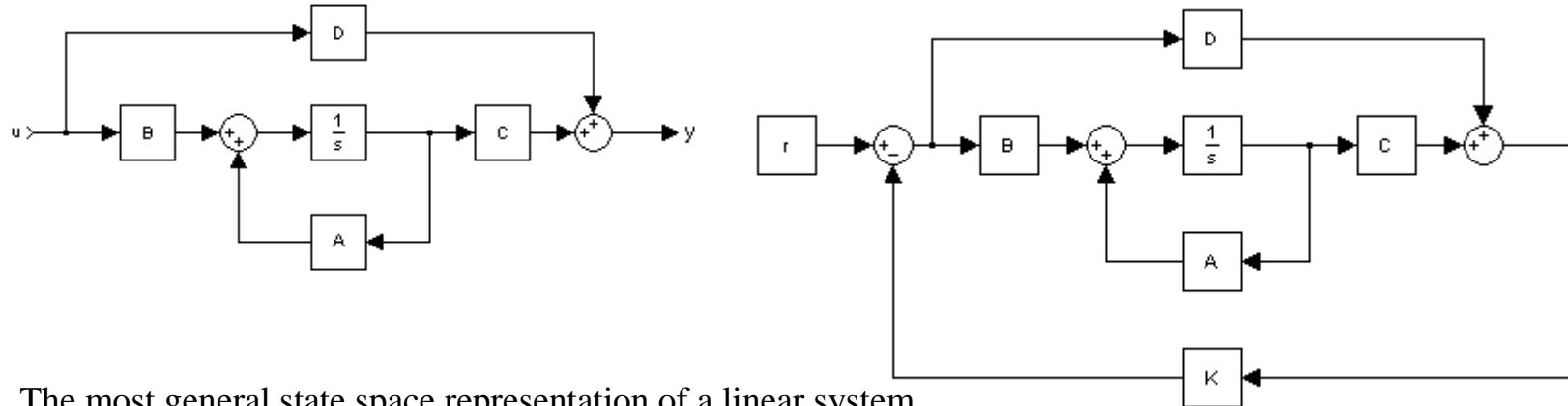
16



# Bijlage 1: piëzo-elementen



# Bijlage 2 – state space modeling



The most general state space representation of a linear system with  $p$  inputs,  $q$  outputs and  $n$  state variables is written in the following form:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = A(t)\mathbf{x}(t) + B(t)\mathbf{u}(t)$$

$$\mathbf{y}(t) = C(t)\mathbf{x}(t) + D(t)\mathbf{u}(t)$$

$\mathbf{x}(\cdot)$  is called the "state vector",

$\mathbf{y}(\cdot)$  is called the "output vector",

$\mathbf{u}(\cdot)$  is called the "input (or control) vector",

$A(\cdot)$  is the "state matrix",

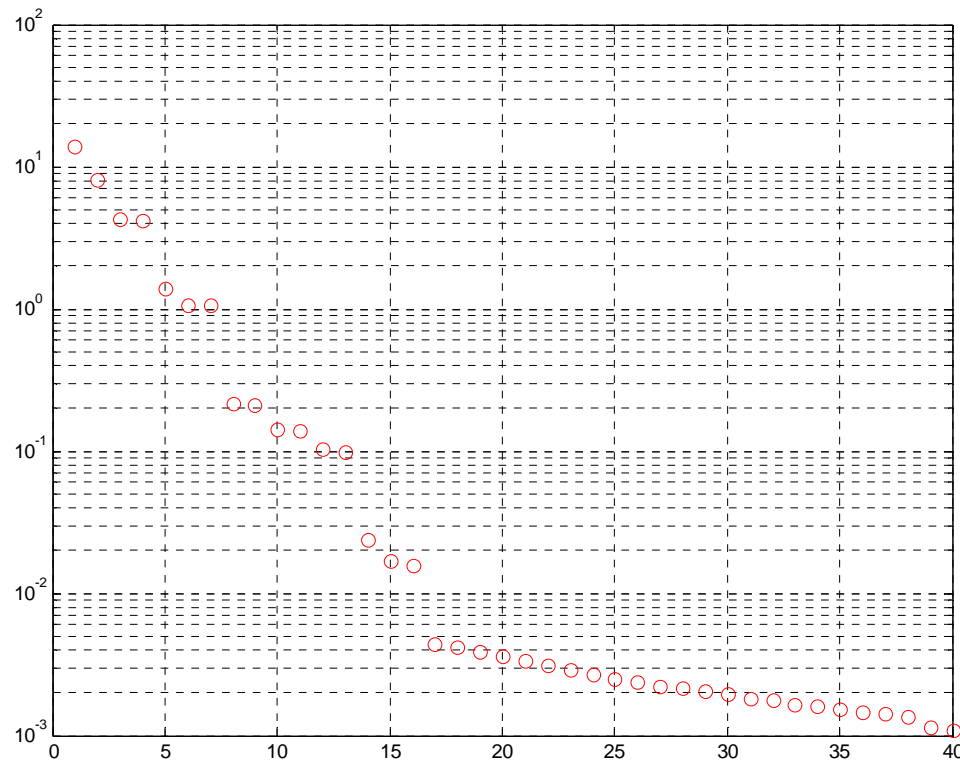
$B(\cdot)$  is the "input matrix",

$C(\cdot)$  is the "output matrix", and

$D(\cdot)$  is the "feedthrough (or feedforward) matrix".

# Bijlage 3 – white noise signal

- Systemidentificatie met een *White Noise Signal*:



# Bijlage 4: gebruikte literatuur

S.O. Reza Moheimani & Andrew J. Fleming, Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping, Springer-Verlag London Limited, 2006

André Preumont, Vibration Control of Active Structures, An Introduction, Boston Kluwer Academic Publishers, 2002

Michel Verhaegen, Identification of the Deterministic Part of MIMO State Space Models given in Innovations Form from Input-Output Data, Pergamon Press Ltd., 1993

Feedback Control of Dynamic Systems, Gene F. Franklin, J. David Powell & Abbas Emami-Naeini, 2002, Prentice-Hall Inc, ISBN: 0-13-098041-2

# Bijlage 5: balk dynamica

$$EI \frac{\partial^4 z(t, x)}{\partial x^4} + \rho A_b \frac{\partial^2 z(t, x)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 M_{px}(t, x)}{\partial x^2} \quad (1)$$

where the beam transverse deflection at point  $x$  and at time  $t$  is denoted by  $z(t, x)$ . Also,  $\rho$  and  $A_b$  represent the density and the cross-sectional area of the beam, while  $E$  and  $I$  are the Young's Modulus and the moment of inertia about the neutral axis of the beam, respectively. The right-hand-side term represents the forcing function produced by the piezoelectric actuator. In this case,  $M_{px}$  is the forcing moment acting on the beam.

The PDE can be solved independently for each mode by using the orthogonality properties of its eigenfunctions  $W_k$  which are as follows for the case of a uniform beam:

$$\int_0^L W_k(x) W_p(x) dx = \delta_{kp} \quad (2)$$

$$\int_0^L \frac{EI}{\rho A_b} \frac{d^4 W_k}{dx^4} W_p dx = \omega_k^2 \delta_{kp} \quad (3)$$

The PDE can be solved independently for each mode by using the orthogonality properties of its eigenfunctions  $W_k$  which are as follows for the case of a uniform beam:

$$\int_0^L W_k(x) W_p(x) dx = \delta_{kp} \quad (2)$$

$$\int_0^L \frac{EI}{\rho A_b} \frac{d^4 W_k}{dx^4} W_p dx = \omega_k^2 \delta_{kp} \quad (3)$$

where  $\omega_k$  describes the natural frequency of the beam at mode  $k$ . Here,  $\delta_{kp}$  is Kronecker's delta function, that is,  $\delta_{kp} = 0$  for all  $k \neq p$ , and equals one if  $k = p$ .

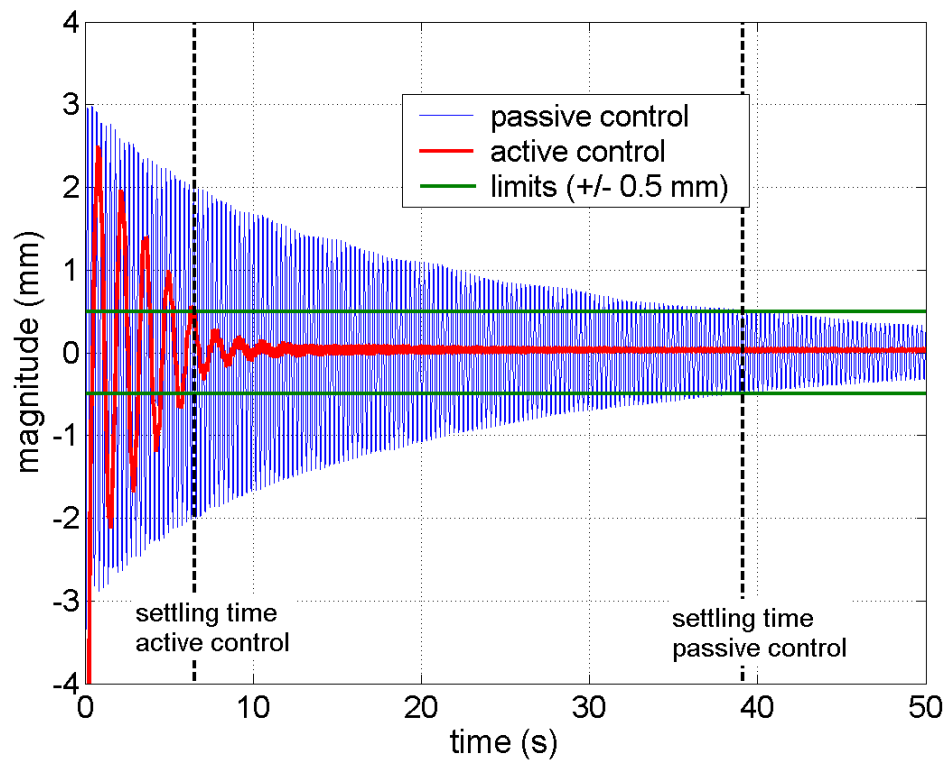
The multiple-input, infinite-output (MPIO) transfer function from the applied actuator-voltages  $V_a(s)$  to the transverse structural deflection  $z(s, x)$  at location  $x$  is

$$G(s, x) = P \sum_{k=1}^{\infty} \frac{W_k(x) \bar{\Psi}_k^T}{s^2 + 2\zeta_k \omega_k s + \omega_k^2} \quad (4)$$

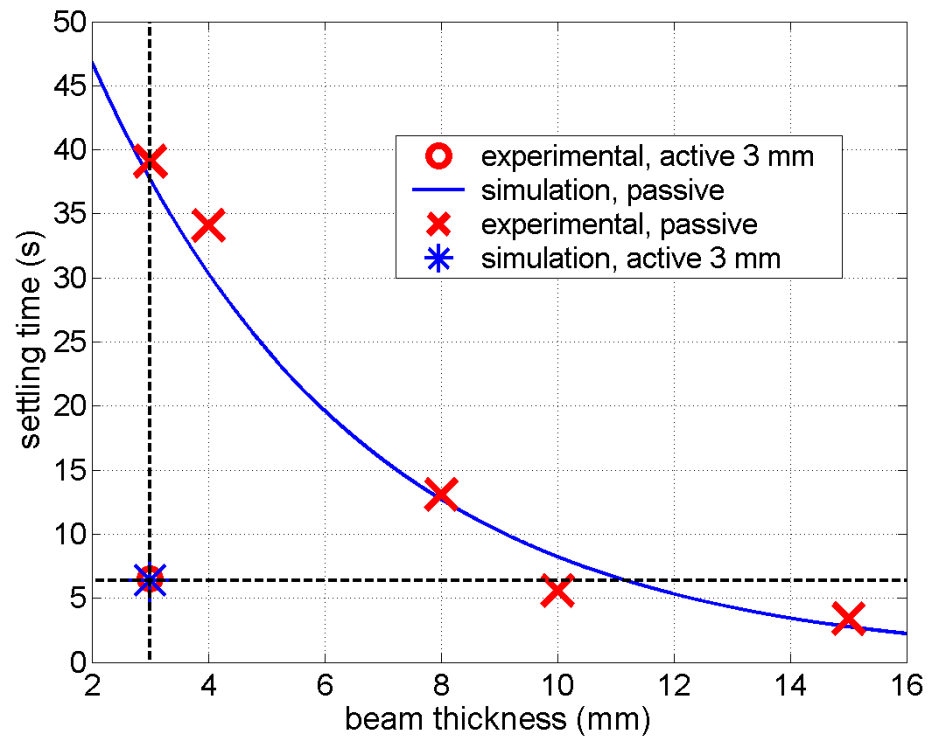
where  $\bar{\Psi}_k = [\Psi_{k1}, \dots, \Psi_{kM}]^T$  and the mode number is denoted by  $k$ .  $\Psi_{ki}$  is a function of the location of the  $i$ th piezoelectric actuator-sensor pair and the eigenfunction  $W_k(x)$  (see [14], [19], [20]). The damping ratio is denoted by  $\zeta_k$  and  $P$ , respectively, is a constant that is dependent on the properties of the structure and the piezoceramic patches.

# Bijlage 6 - passief versus actief

Resultaten experimenten (balk met dikte 3 millimeter).



# Bijlage 7 – experiment versus simulatie



# Bijlage 8 - simulatie

Matlab/simulink.

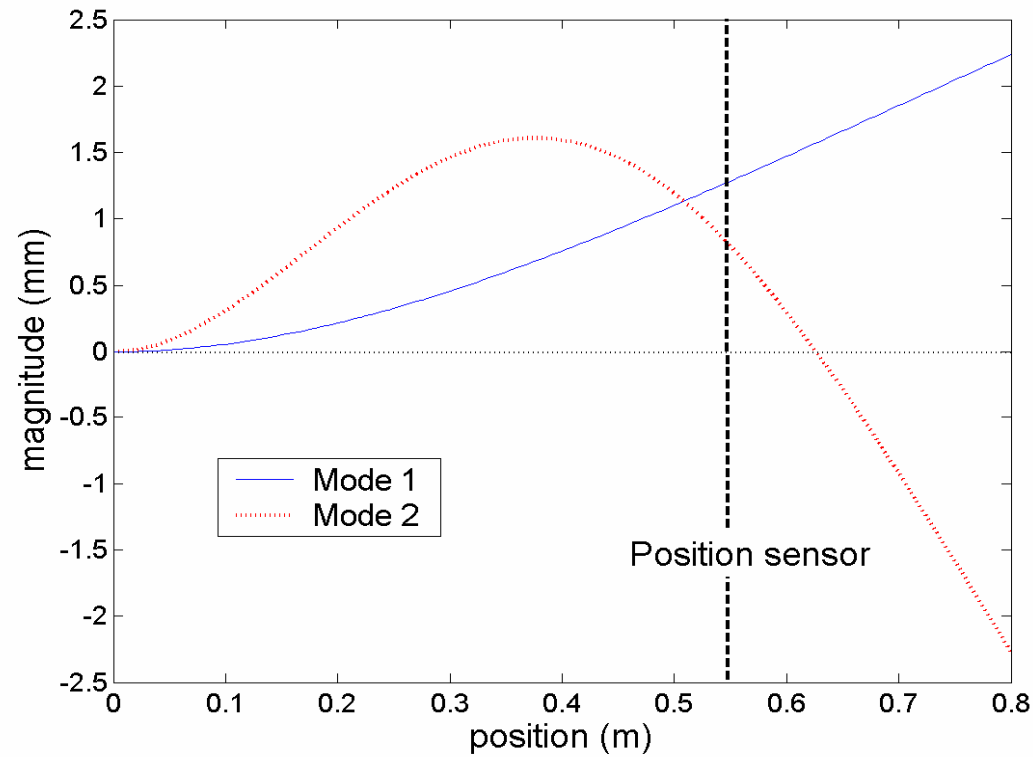
$$G(s, x) = P \sum_{k=1}^{\infty} \frac{W_k(x) \bar{\Psi}_k^T}{s^2 + 2\zeta_k \omega_k s + \omega_k^2}$$

Krachtverstoring door een 'impulse function'.

Singular value per state volgt uit systeemidentificatie.



# Bijlage 9 – positie sensor



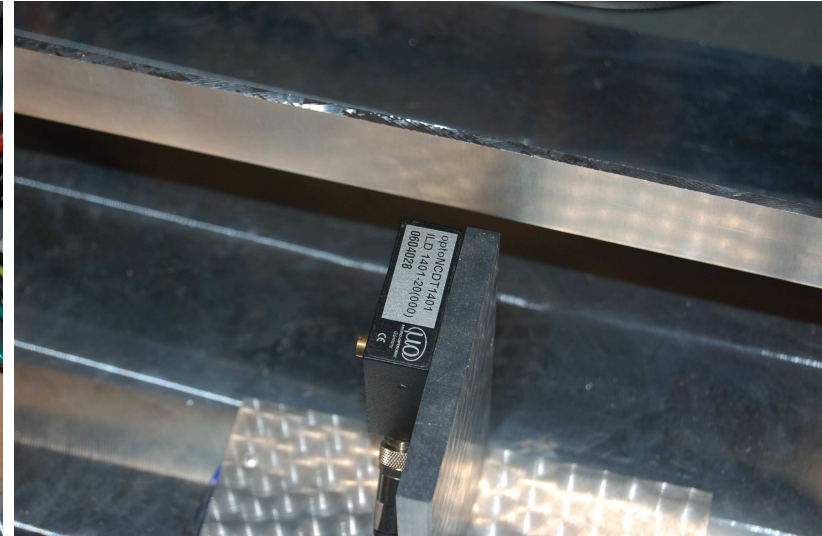
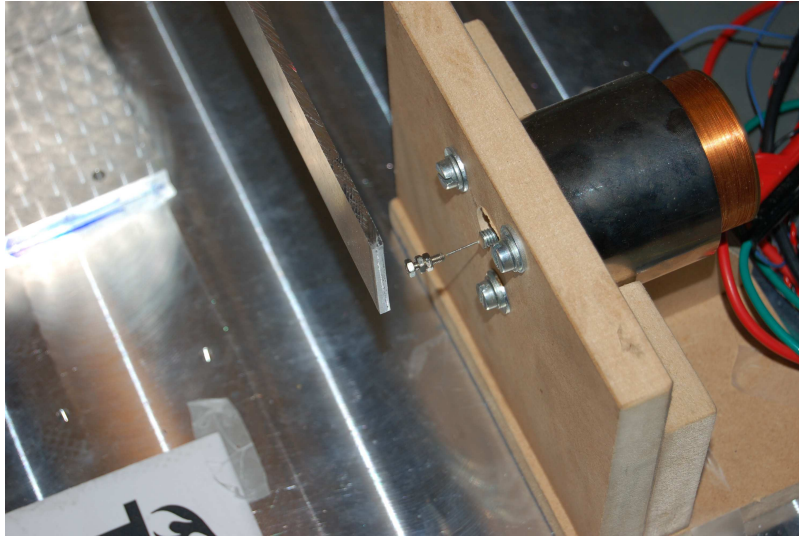
# Bijlage 10 – controller

Loop shaping met SISOtool functie in Matlab

Bij een gegeven systeem een controller tunen door het toevoegen en verplaatsen van polen/nulpunten

$$\begin{array}{c} \text{Transfer function:} \\ -1.696e006 \\ \hline s^2 + 68.86 s + 1493 \end{array}$$

# Bijlage 11: foto's proefopstelling



June 11, 2007

27