

---

# Ausregelung von Lastmomenten an Kransäulen durch lagegesteuerte Gegengewichte

Dipl.-Ing. Joachim Wülbeck

04. April 2005

---

## Nicht Ziel der Arbeit

---



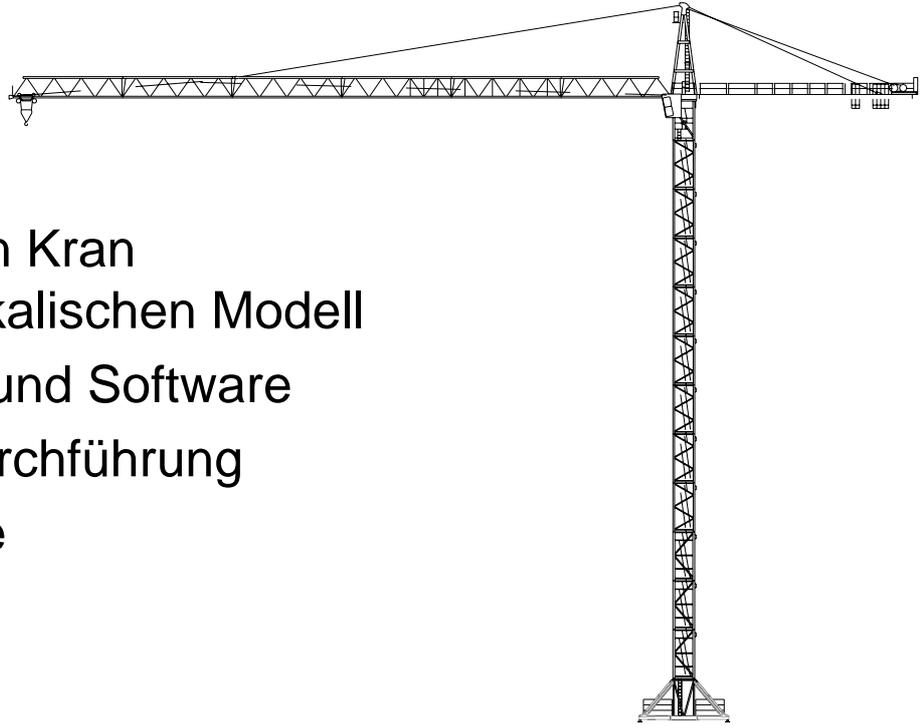
Kraneinsturz auf der Königsallee in Düsseldorf am 29.04.2003

---

# Inhalt

---

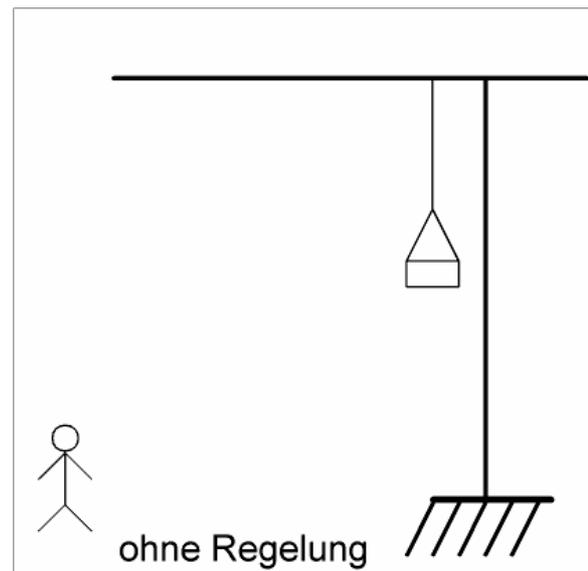
- Motivation
- Überblick
  
- Vom realen Kran zum physikalischen Modell
- Hardware und Software
- Versuchdurchführung
- Ergebnisse



---

# Idee

- **Beobachtung:**  
**Kransäule verbiegt sich**
  - beim Heben und Absetzen von Lasten
  - beim Verfahren von Lasten



# Idee

## ■ Beobachtung:

### Kranssäule verbiegt sich

- beim Heben und Absetzen von Lasten
- beim Verfahren von Lasten

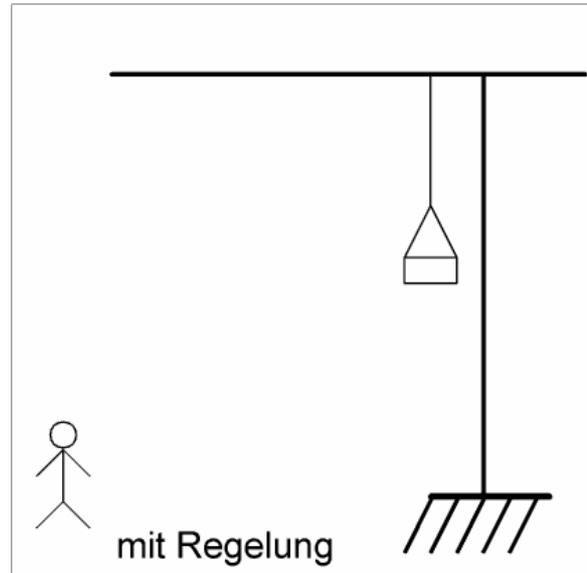
## ■ Folge:

- Die Kransäule ist ständig wechselnden Biegemomenten ausgesetzt,
- das Fundament ebenfalls
- Der Drehkranz hat erhöhten Verschleiß

## ■ Idee:

### Regelbares Gegenmoment

- Kransäule, Drehkranz und Fundament werden weniger stark belastet
- Die Last ändert ihre Verfahrhöhe nicht !
- Schwerere Lasten können gehoben werden

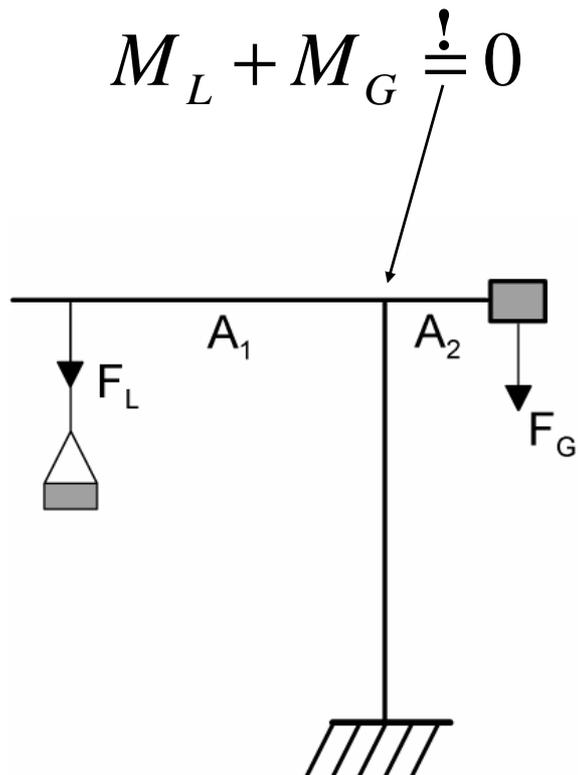


# Grundlagen

$$F_L \cdot A_1 = M_L$$

$$F_G \cdot A_2 = M_G$$

$$M_L + M_G \stackrel{!}{=} 0$$



# Aufgabenstellung

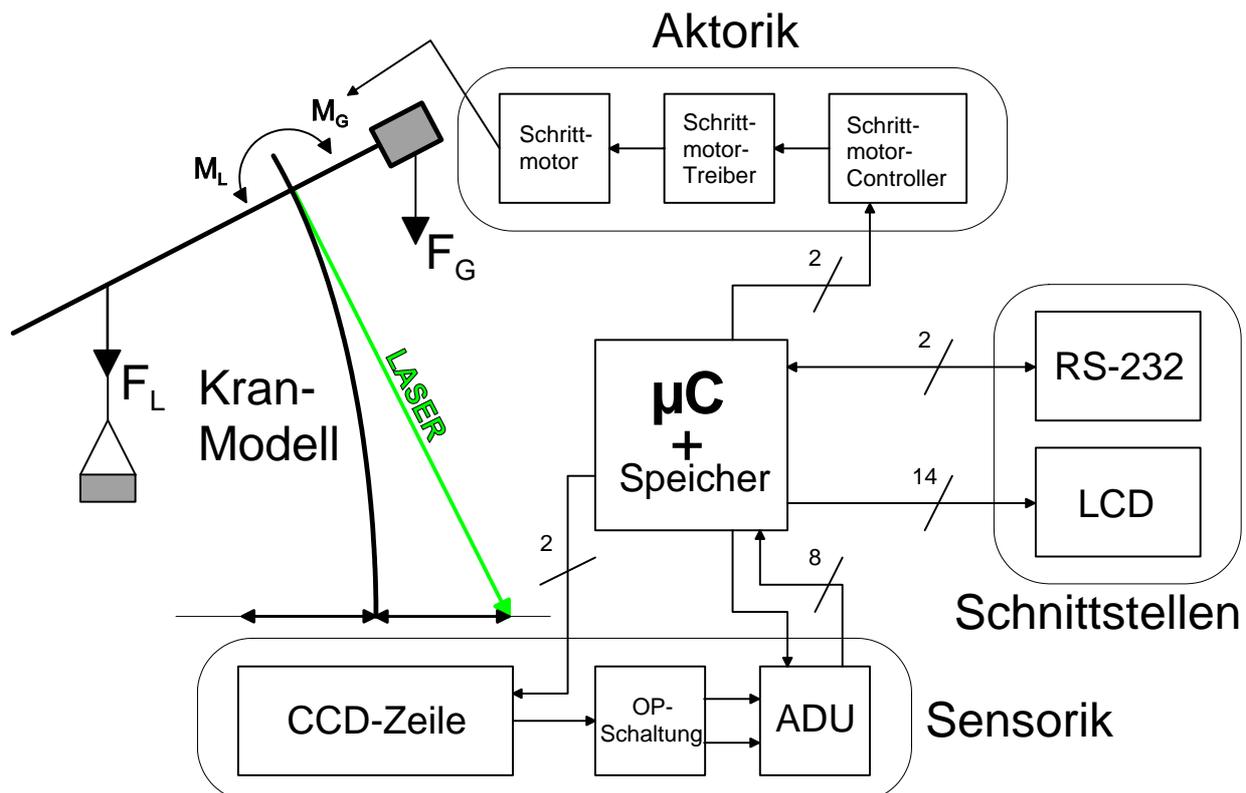
## ■ Problemstellung

- Wechselnde Lastmomente  $M_L$  müssen geregelt werden
- Das Gegenmoment  $M_G$  muss dafür verstellbar sein
- Die Durchbiegung  $f$  der Kransäule muss sehr genau gemessen werden

## ■ Aufgabenstellung

- Bau eines realistischen Kranmodells
- Entwicklung der Soft- und Hardware für eine digitale Regelung
- Basis dafür: 8-Bit 8051 Mikrocontroller
  - Optoelektronische Messung der Ist-Größe (CCD-Zeilensensor)
  - Schrittmotor getriebenes selbsthaltendes Stellglied
- **Der Kran soll sich bei wechselnden Lastmomenten nicht mehr verbiegen !**

# Überblick



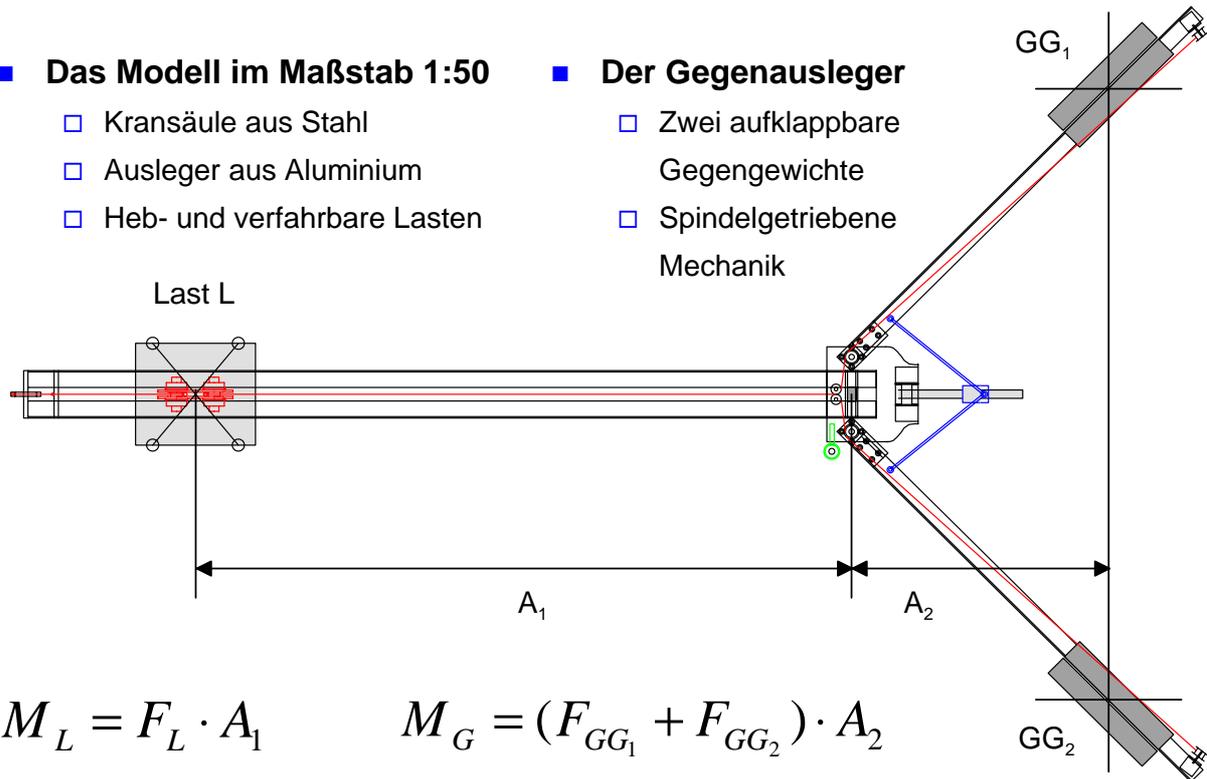
# Modellkonzept

## ■ Das Modell im Maßstab 1:50

- Kransäule aus Stahl
- Ausleger aus Aluminium
- Heb- und verfahrbare Lasten

## ■ Der Gegenausleger

- Zwei aufklappbare Gegengewichte
- Spindelgetriebene Mechanik



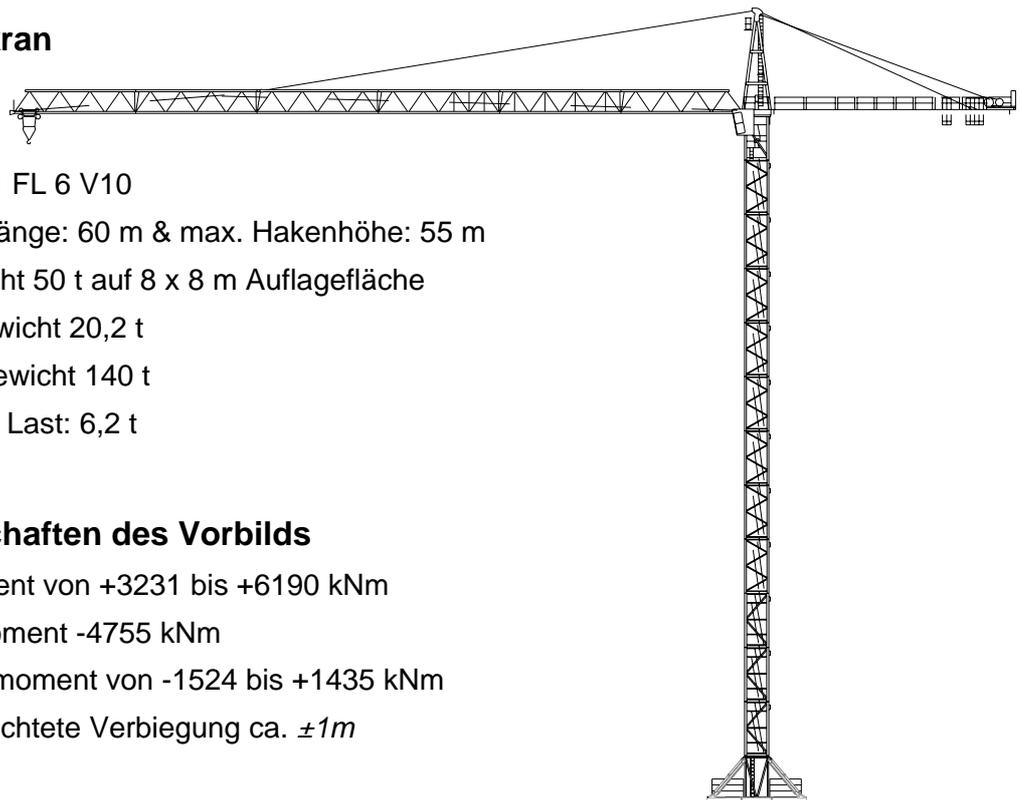
# Realer Kran

## ■ MAN Wolffkran

- Typ: 7031 FL 6 V10
- Auslegerlänge: 60 m & max. Hakenhöhe: 55 m
- Fußgewicht 50 t auf 8 x 8 m Auflagefläche
- Gegengewicht 20,2 t
- Gesamtgewicht 140 t
- Maximale Last: 6,2 t

## ■ Die Eigenschaften des Vorbilds

- Lastmoment von +3231 bis +6190 kNm
- Gegenmoment -4755 kNm
- => Biegemoment von -1524 bis +1435 kNm
- => Beobachtete Verbiegung ca.  $\pm 1m$



# Modellbildung

## Modellbildung mit „Maßstabsfaktor für gleiche Dehnung“

„Zwei Körper sind bezüglich der elastischen Dehnungen mechanisch ähnlich, wenn die Hookeschen Kennzahlen  $H_0$  übereinstimmen“ [Dubbel 1999, B 7.2.1]

$$H_0 = \frac{F_M}{(E_M \cdot I_M^2)} = \frac{F_H}{(E_H \cdot I_H^2)} \Rightarrow F_V = \frac{F_H}{F_M} = \frac{E_H \cdot l_V^2}{E_M}$$

H : Hauptausführung  
M : Modellausführung  
V : Verhältnis

E : Elastizitätsmodul [N/mm<sup>2</sup>]    I : Flächenträgheitsmoment 2. Grades [m<sup>4</sup>]

Bei gleichem Material  $E_M = E_H$  folgt aus den Formeln für die Modellfaktoren

- Maßstab der Länge  $l_V = 50$
- Maßstab der Kräfte  $F_V = l_V^2 = 2500$

# Modellbildung

## ■ Das maximale Lastmoment am Modell

- $M_L = 49,52 \text{ Nm}$

## ■ Einrechnung einer Reserve von 20 %

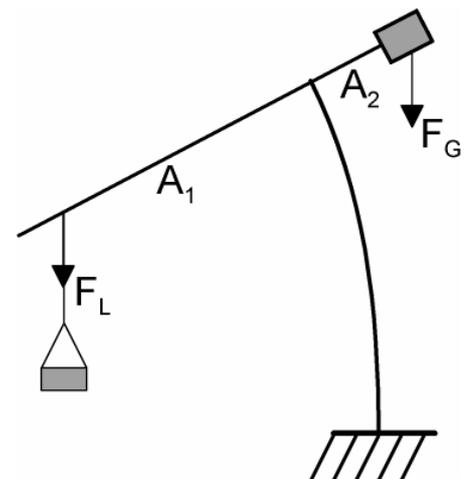
- $M_G = -60 \text{ Nm}$  maximales Gegenmoment
- 12 kg Gegengewicht bei Hebellänge = -0,5 m

## ■ Das maximale Biegemoment

- $M_G = -30 \text{ Nm}$  mittleres Gegenmoment
- $M_L \approx +50 \text{ Nm}$  maximales Lastmoment
- 
- $M_B \approx +20 \text{ Nm}$  Biegemoment in der Summe

## ■ Verbiegung der Kransäule

- +1 m beim Originalkran
- +0,02 m am Modellkran

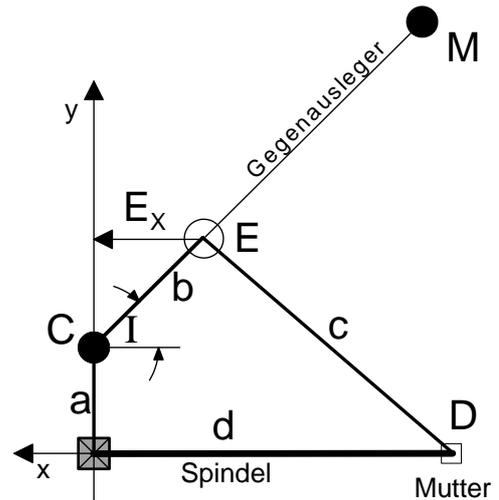
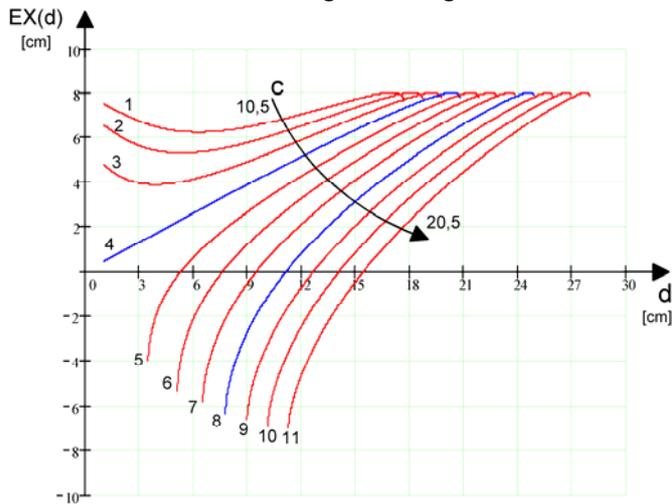




# Aktorik

## ■ Das Stellglied

- M : Moment das der Gegenausleger erzeugt
- E : Anlenkpunkt
- d : Ansteuerlänge
- I : Winkel des Gegenauslegers



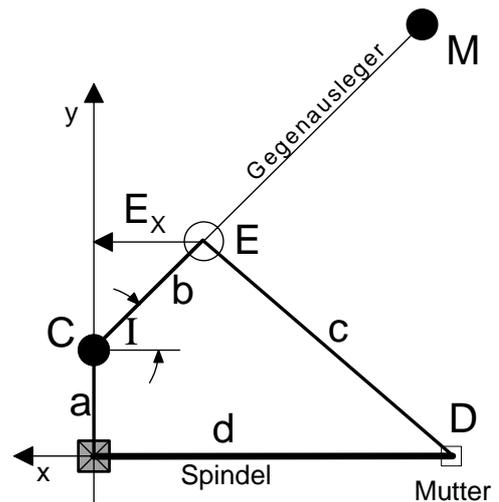
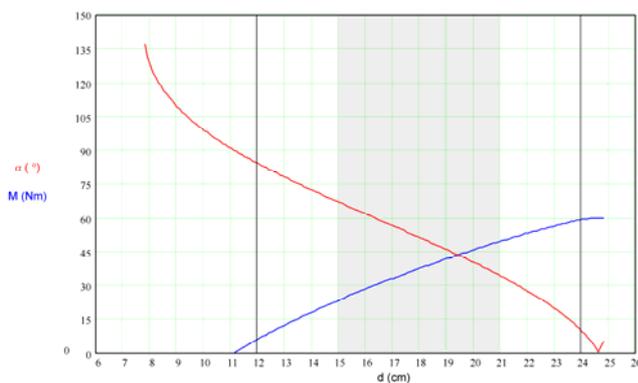
# Aktorik

## ■ Das Stellglied

- M : Moment das der Gegenausleger erzeugt
- E : Anlenkpunkt
- d : Ansteuerlänge
- I : Winkel des Gegenauslegers

## ■ Stellbereich

- d = 12 .. 24,6 cm
- I = 84° .. 0°



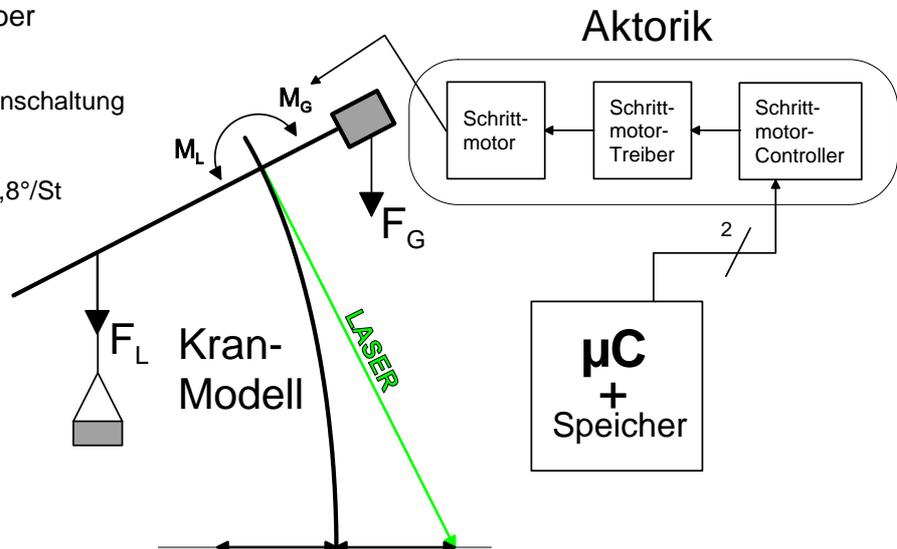
## ■ Regelbereich für alle Lastfälle

- $M_G = 26 \dots 50 \text{ Nm}$
- d = 15 .. 21 cm
- I = 65° .. 37°

# Aktorik

## Die elektronischen Komponenten des Stellgliedes

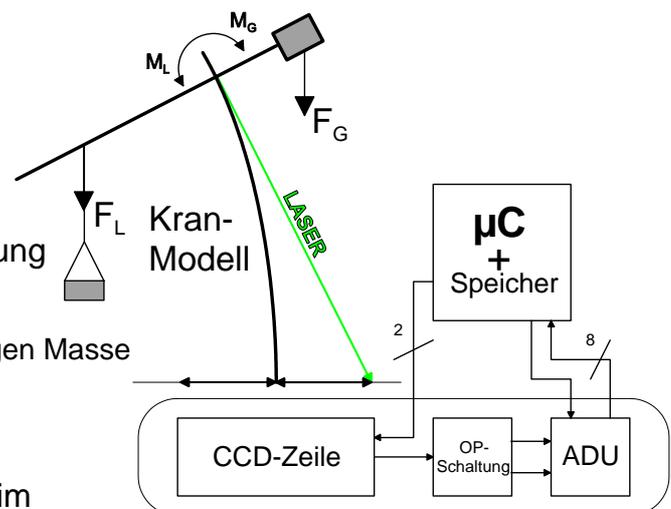
- Schrittmotor-Controller
  - L297
  - Richtungssignal CW / CCW
  - Taktsignal CLK
- Schrittmotor-Treiber
  - L298
  - Bipolar-Brückenschaltung
- Schrittmotor
  - 200 St/U  $\leftrightarrow$  1,8°/St
  - 1,4 A bei 5 V



# Sensorik

## Die Komponenten des Messtechnischen Systems

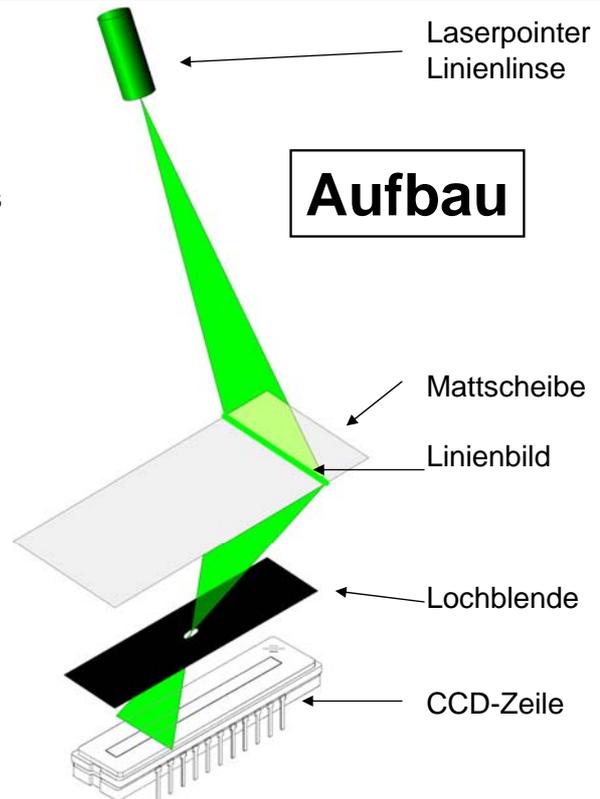
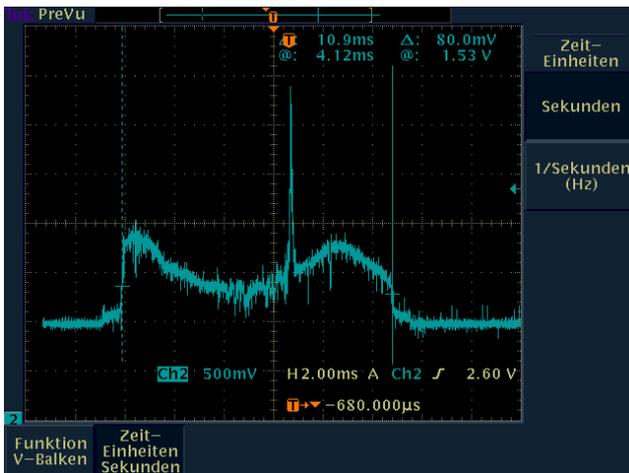
- Laserpointer mit Optik
- CCD-Zeilensensor von Sony
  - ILX554B
  - 2048 Pixel je 14 $\mu m$  breit
  - 28,67mm optische Länge
- OP-Schaltung zur Signalanpassung
  - TLC274 von TI
  - +5 V Versorgungsspannung gegen Masse
  - $U_{OUT} = 0,05 \dots 3,8 V$
  - Slew Rate SR = 3,6 V/ $\mu s$
- Analog-Digital-Wandler von Maxim
  - MAX1426
  - 10 Bit parallel
  - 100 ksp/s bis 10 Msp/s



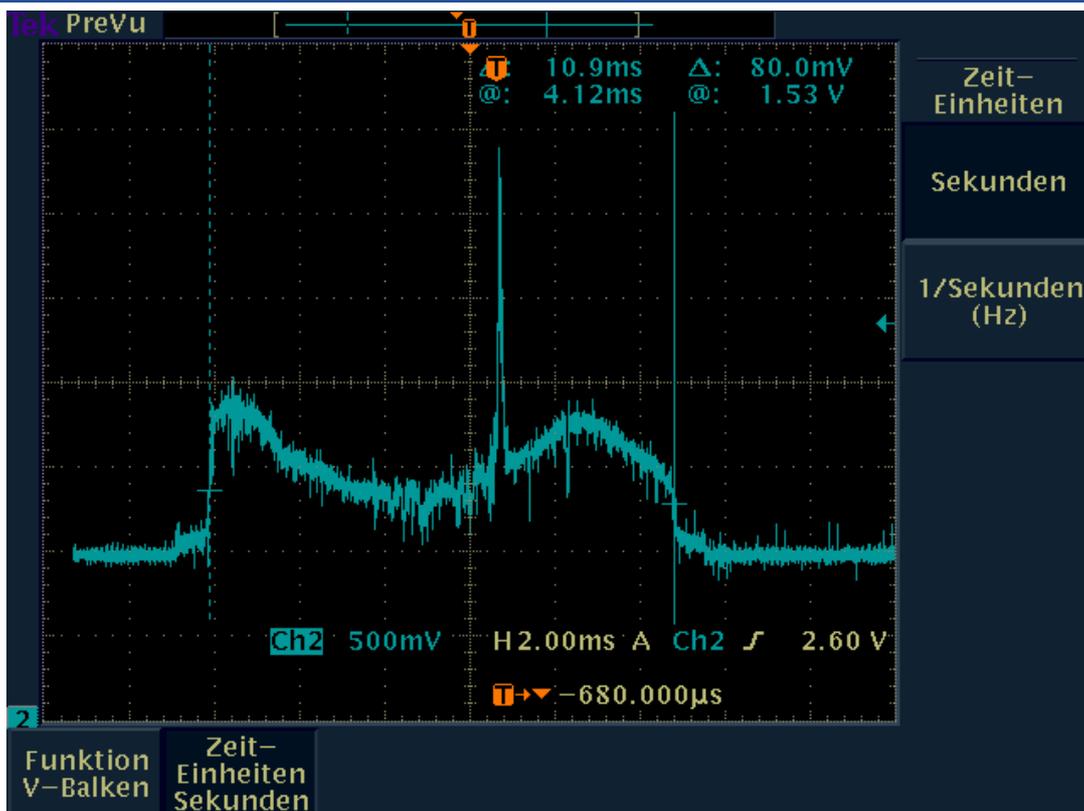
# Sensorik - Optik

## ■ Aufbau und Eigenschaften des optischen Systems

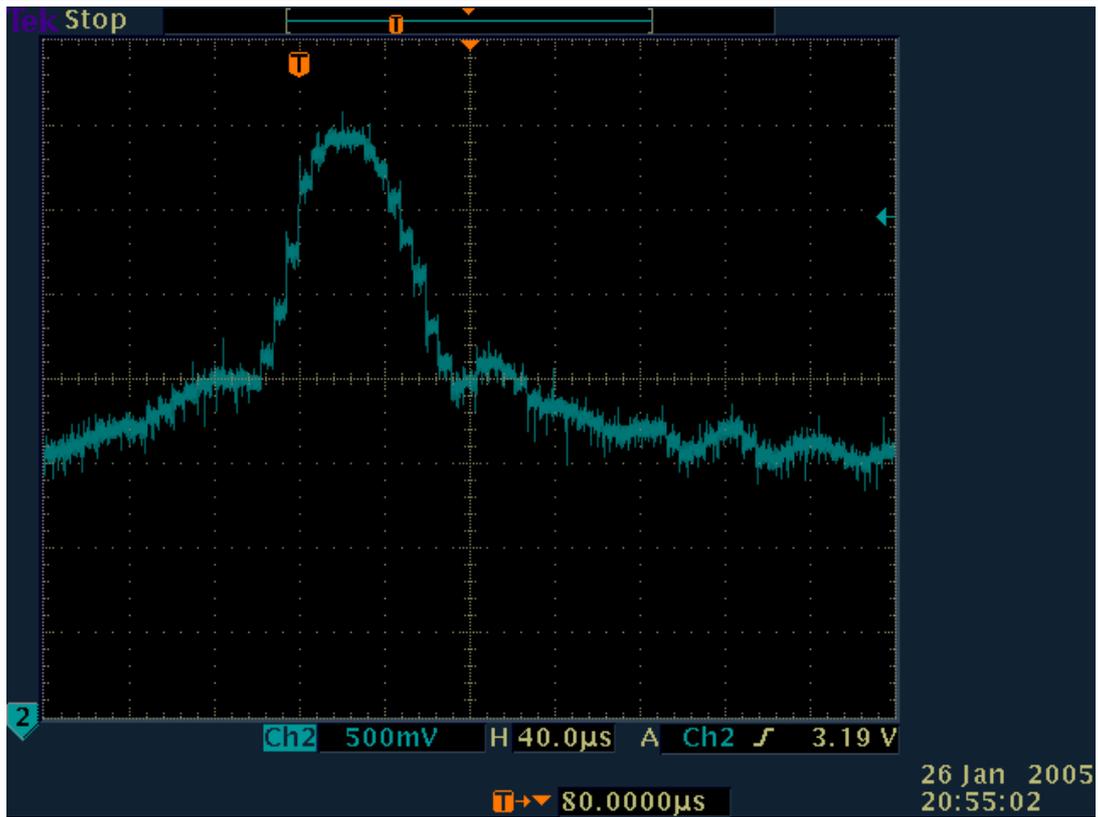
- Dämpfung des Umgebungslichtes
- Veränderung des Abbildungsmaßstabs
- Schärfere Bild
- nur 15 Pixel breit  $\leftrightarrow$  0,21mm



# Sensorik - Optik



# Sensorik - Optik



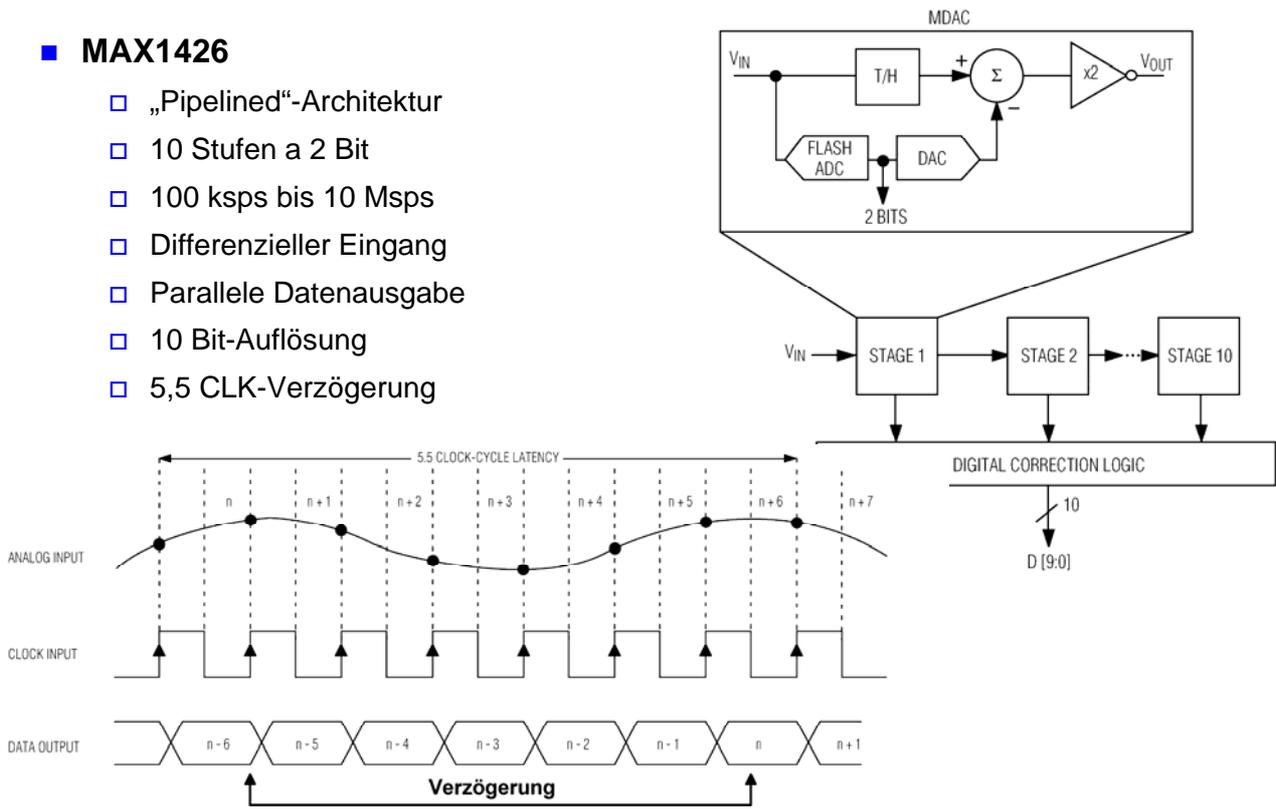
# Sensorik - Optik



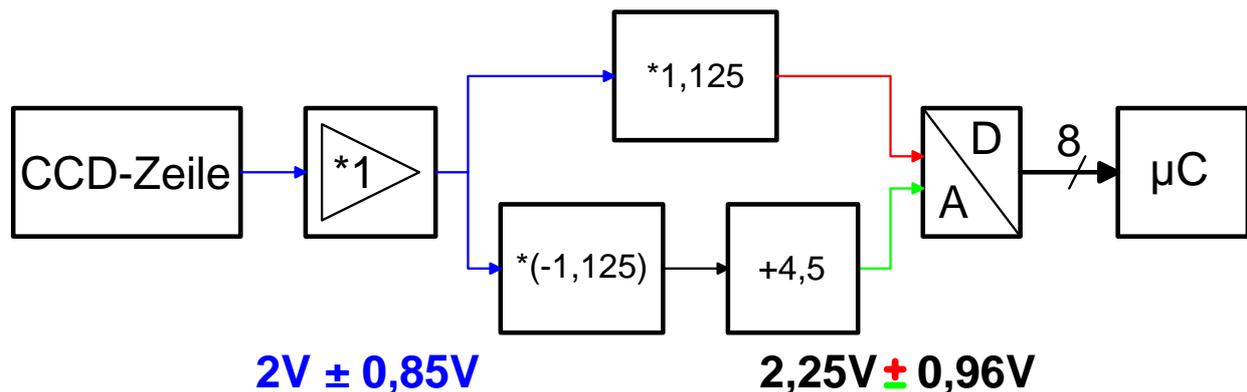
# Sensorik - ADU

## ■ MAX1426

- „Pipelined“-Architektur
- 10 Stufen a 2 Bit
- 100 ksps bis 10 Msps
- Differenzieller Eingang
- Parallele Datenausgabe
- 10 Bit-Auflösung
- 5,5 CLK-Verzögerung



# Sensorik - OP-Anpasssschaltung I



## ■ Signal der CCD-Zeile

- Ausgangsspannung gegen GND
- 2,85 V bei Dunkelheit
- 1,15 V bei maximaler Belichtung
- =>  $2 V_{DC} \pm 0,85 V_{AC}$

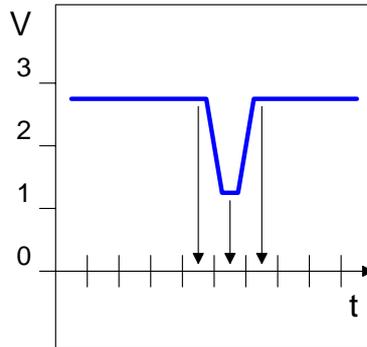
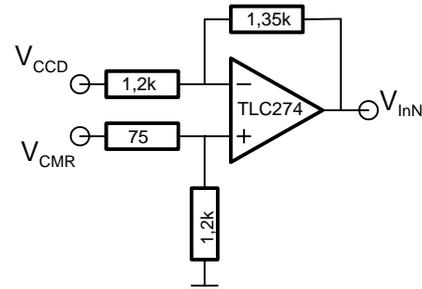
## ■ Eingang des ADU

- Differenziell um 2,25 V
- maximale Signalstärke  $\pm 1 V$
- =>  $2,25 V_{DC} \pm 1 V_{AC}$

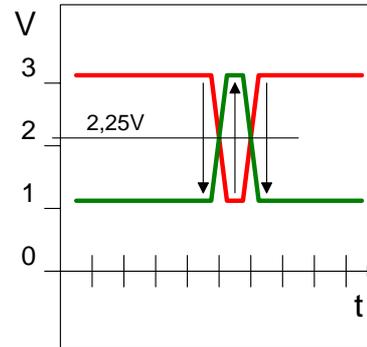
# Sensorik - OP-Anpasssschaltung II

## ■ invertierender Verstärker

- $V_R = 1,15$
- $+ 4,5 \text{ V}$



Eingangssignal



Ausgangssignale

# Sensorik - Software

## ■ Anforderungen an den Treiber

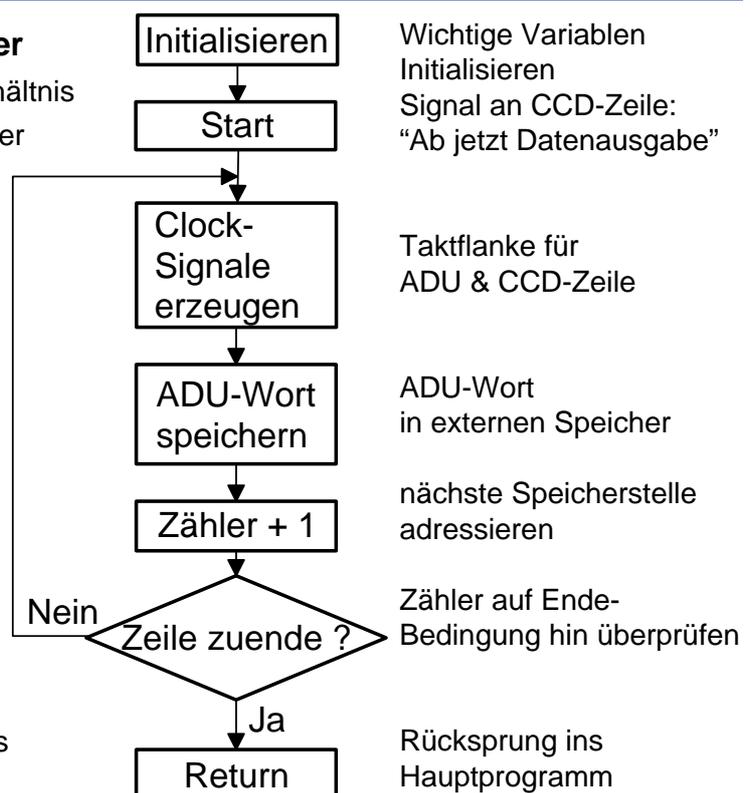
- Takt hat 50% An-zu-Aus Verhältnis
- Ausleseschleife muss schneller sein als 100 kHz

## ■ Eigenschaften des $\mu\text{C}$

- 22,11884 MHz XTAL
- 6 CLK/Instr.
- 271 ns/Instr.

## ■ Eigenschaften der Software

- 9 Instr./Schleife
- 2,439  $\mu\text{s}$ /Schleife
- jedes ADU-Wort wird zwei mal gespeichert
- Zwei Schleifen = eine Taktperiode  $T = 4,878 \mu\text{s}$
- Auslesefrequenz  $f = 205 \text{ kHz}$



Wichtige Variablen  
Initialisieren  
Signal an CCD-Zeile:  
"Ab jetzt Datenausgabe"

Taktflanke für  
ADU & CCD-Zeile

ADU-Wort  
in externen Speicher

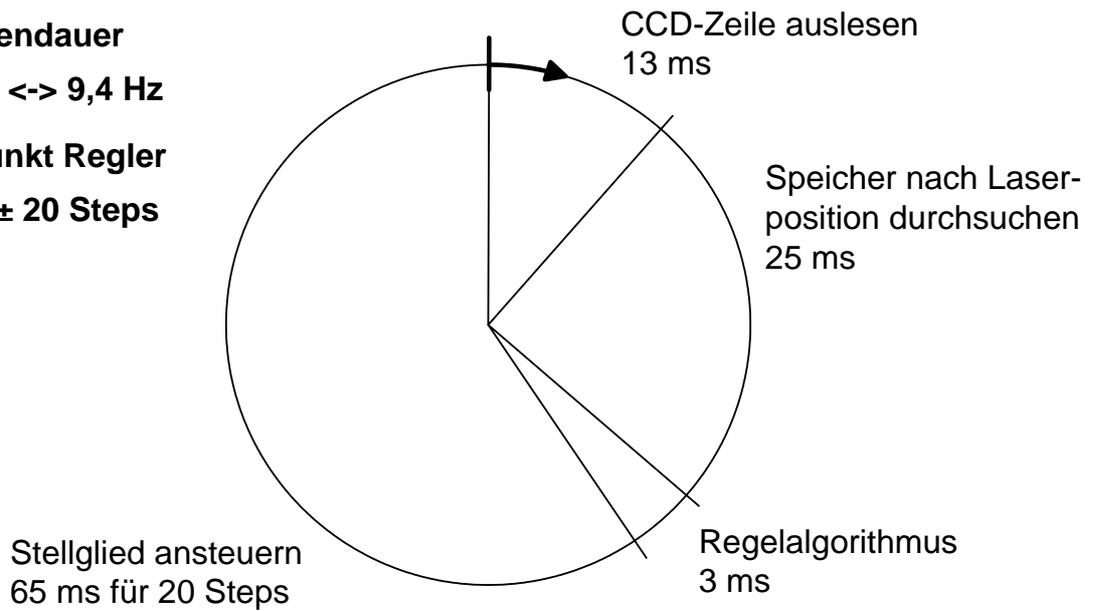
nächste Speicherstelle  
adressieren

Zähler auf Ende-  
Bedingung hin überprüfen

Rücksprung ins  
Hauptprogramm

# Hauptprogramm

- **Schleifendauer**  
106 ms  $\leftrightarrow$  9,4 Hz
- **Drei-Punkt Regler**  
0 oder  $\pm$  20 Steps



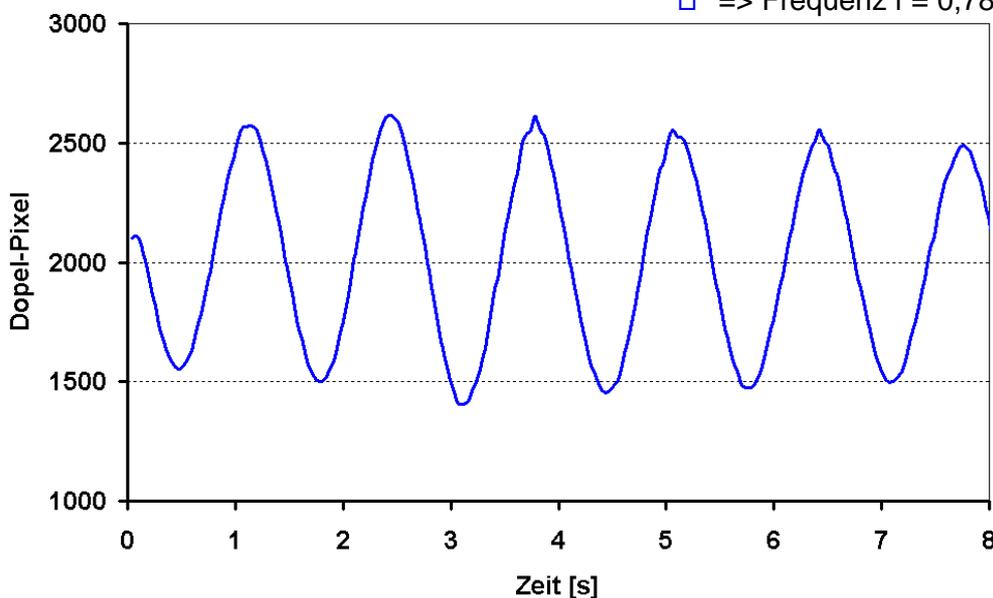
# Versuchsdurchführung

## ■ 1. Versuch

- freie Schwingung der Kransäule
- Messintervall: 42,53 ms

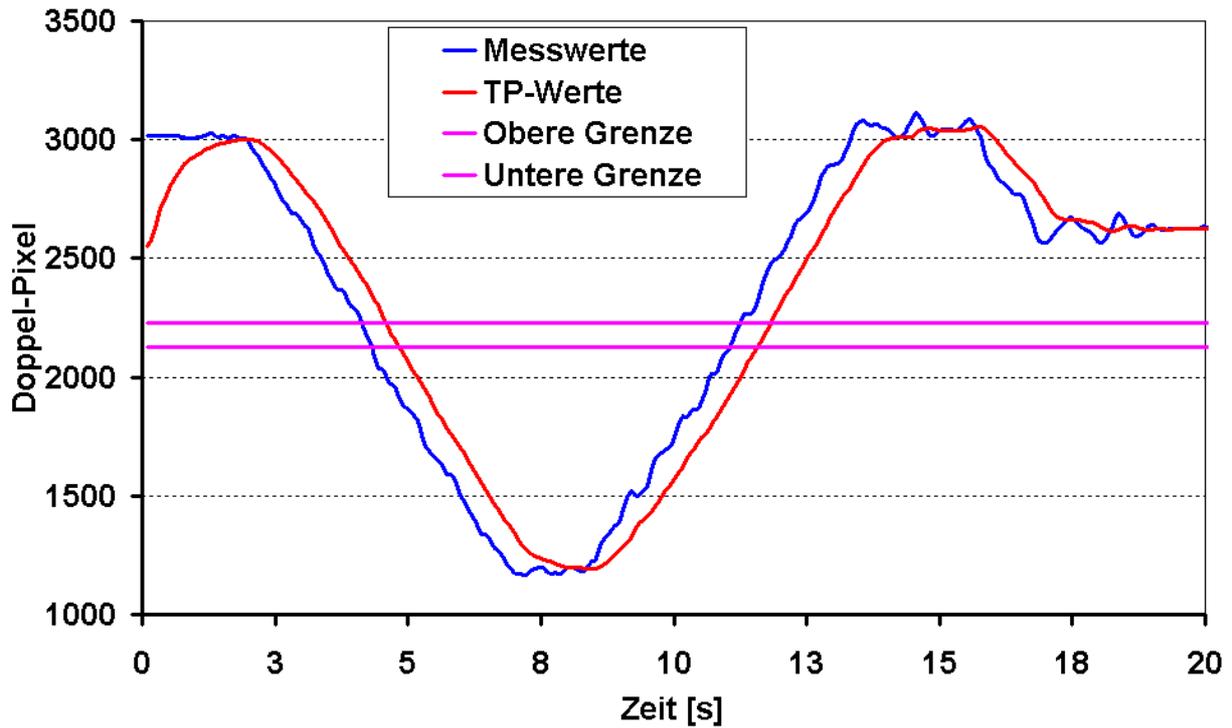
## ■ Ergebnis

- ca. 30 Messwerte pro Periode
- $\Rightarrow$  Periodendauer  $T = 1,276$  Sekunden
- $\Rightarrow$  Frequenz  $f = 0,784$  Hz



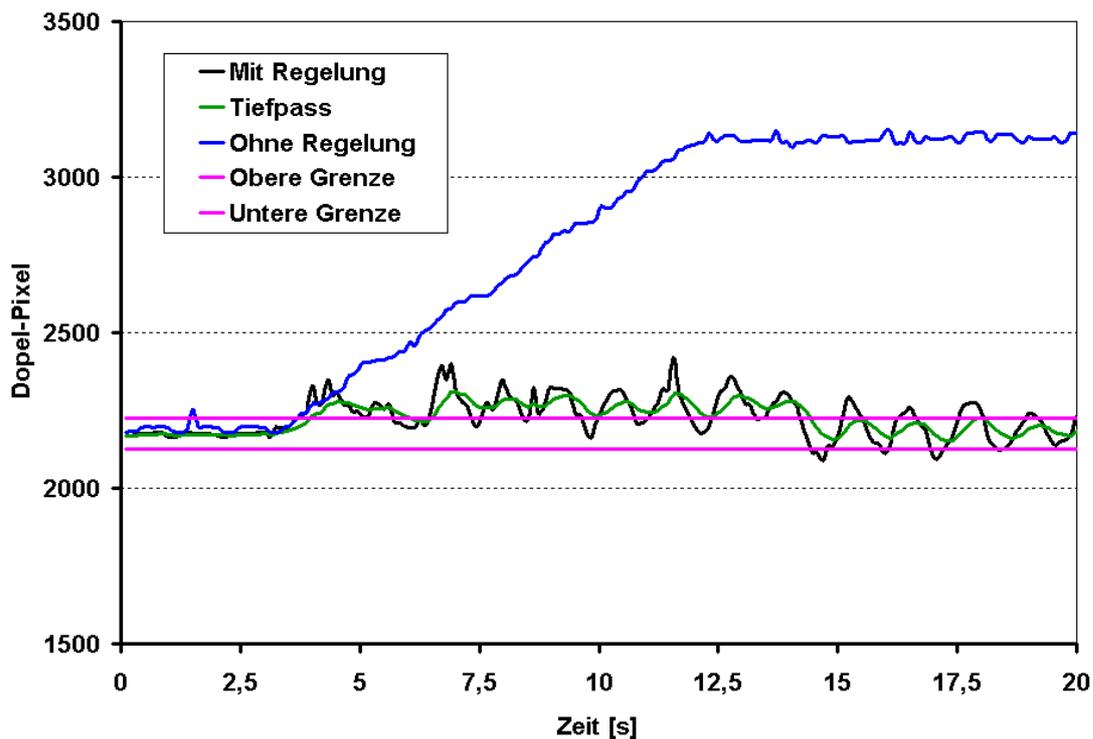
# Versuchsdurchführung

Verfahren einer Last ohne Regelung - Stellglied bei 50% => Gegenmoment = 30Nm



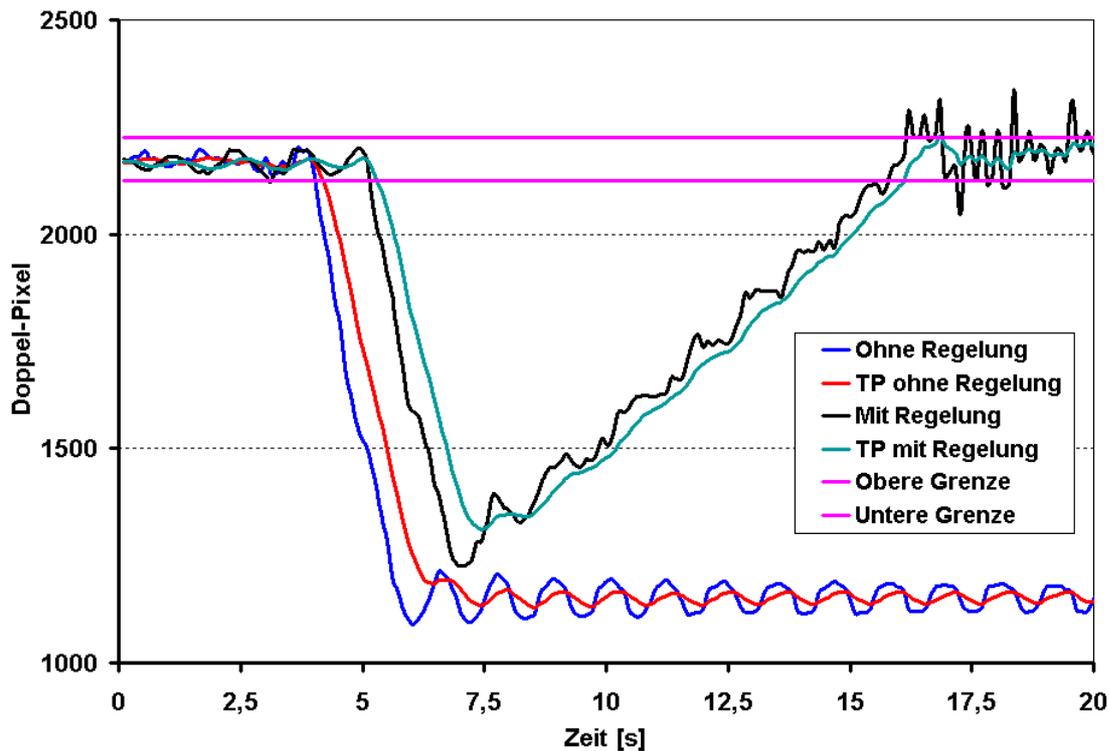
# Versuchsdurchführung

Verfahren einer Last mit und ohne Regelung im direkten Vergleich



# Versuchsdurchführung

Anheben einer Last als Sprungfunktion => Sprungantwort der Regelung



## Ergebnisse

### ■ Das physikalische Modell

- Maßstabsgetreu für Längen und Kräfte
- Statische Ähnlichkeit der Kransäulenverbiegung
- Der geteilte Gegenausleger hat sich als sehr brauchbares Stellglied erwiesen.

### ■ Die Elektronik

- Die CCD-Zeile ist ein sehr genaues Messglied.
- Der 8051  $\mu$ C ist ausreichend für diese Regelung.

### ■ Die Regelung

- Implementiert wurde eine eine Drei-Punkt-Regelung.
- Das Verfahren von Lasten kann ausgeregelt werden.
- Die Sprungantwort (Heben / Senken einer Last) ist befriedigend.
- Kein Schwingen => die Regelung ist stabil.

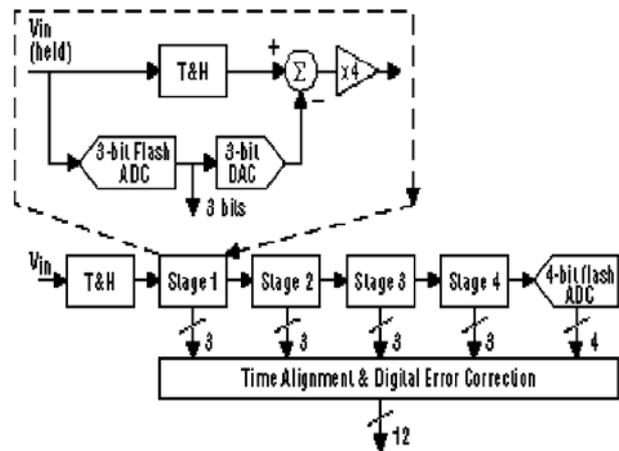
**Danke !**

# Sensorik - ADU

## „Pipelined“-ADU-Architektur

### Eigenschaften

- Differenzieller Eingang
- 1 Msps bis 105 Msps
- 10 Bit bis 16 Bit Auflösung
- einfache Ansteuerung mit CLK-Signal
- parallele Datenausgabe
- Ausgabe erfolgt mit Verzögerung



1. Stufe, 3Bit-Wandler:  $V_E = 3853mV \Rightarrow |111| \Rightarrow 3853mV - 3584mV = 269mV$
2. Stufe, 3Bit-Wandler:  $V_E = 1076mV \Rightarrow 0|10| \Rightarrow 1076mV - 1024mV = 52mV$
3. Stufe, 3Bit-Wandler:  $V_E = 208mV \Rightarrow 0|00| \Rightarrow 208mV - 0mV = 208mV$
4. Stufe, 3Bit-Wandler:  $V_E = 832mV \Rightarrow 0|01| \Rightarrow 832mV - 512mV = 320mV$
5. Stufe, 4Bit-Wandler:  $V_E = 1280mV \Rightarrow 0|101| \Rightarrow 1280mV$

Ergebnis: 1111 0000 1101  $\leftrightarrow$  3,853 V bei LSB = 1 mV

# Sensorik - Software

CCD\_Lesen:

```
MOV DPTR, #0x1000;    bei 1000h anfangen
SETB P3_3;           CCD_Clk auf 1
CPL P3_4;            ROG invertieren (hier 1->0)
CPL P3_4;            ROG invertieren (hier 0->1)
```

Schleife:

```
CPL P3_3;           CCD_Clk invertieren (hier 1->0->1->0->...)
CPL P3_5;           ADU_Clk invert. (0->1->0->...)
MOV A, 0x90;        P1 -> A (ADU- Wert in A speichern)
XRL A, #128;        2er-Komplement rückgängig machen (XOR 1000.0000)
MOVX @DPTR, A;     A -> externen Speicher
INC DPTR;           DPTR + 1
MOV A, 0x83;        DPH -> A (Ist DPTR > 2100)
CJNE A, #0x21, Schleife; wenn A < 21 jump "Schleife"
SETB P3_3;          CCD_Clk auf 1
SETB P3_4;          CCD_ROG auf 1
CLR P3_5;           ADU_CLK auf 0
RET;                ende "CCD_Lesen"
```

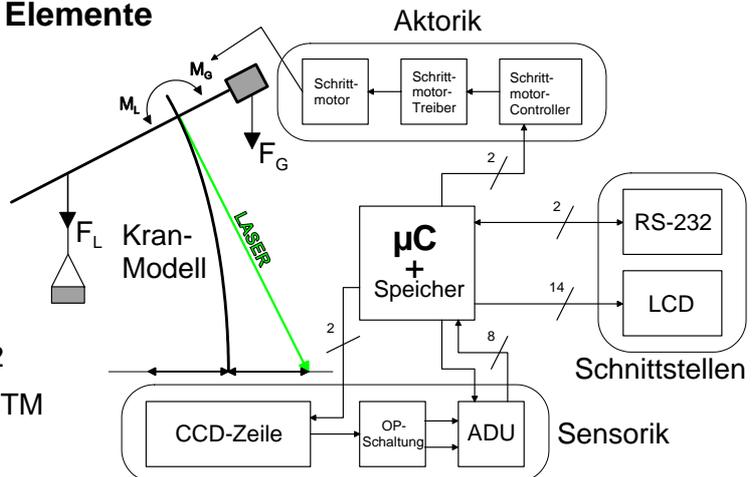
# Überblick

## ■ Das Gesamtsystem

- Maßstabsgetreues physikalisches Modell
- 8-Bit 8051  $\mu$ C-Applikation
- Optoelektronische Messeinrichtung der Ist-Größe
- Schrittmotor getriebenes selbsthaltendes Stellglied

## ■ Optische und elektronische Elemente der digitalen Regelung

- CCD-Zeilensensor von Sony ILX554B
- OPs von Texas Instruments TLC274
- ADU von Maxim - MAX1426
- $\mu$ C von Atmel - AT89C51AC2
- Motorcontroller -treiber von STM L297 und L298



# Signale im System

## ■ Elemente die $\mu$ C-Platine

- 8051  $\mu$ C - Atmel AT89C51AT2
- 32 kByte statisches XRAM
- RS232 Schnittstelle
- LC-Display

## ■ Signale im System

- Laser -> CCD-Sensor
- 2 Bit  $\mu$ C -> CCD-Sensor
- Analog CCD -> ADU
- 1 Bit -> ADU
- 8 Bit parallel vom ADU ->  $\mu$ C
- 2 Bit ->  $\mu$ C -> Aktorik

