

Eine Glasfaser als Sensorelement: Entwicklung eines faseroptischen Zweiachs-Neigungssensors

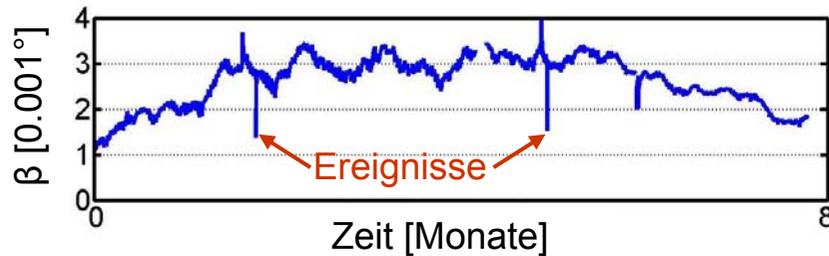
Klaus MACHEINER



Neigungsmessung: Anwendungen und Herausforderungen

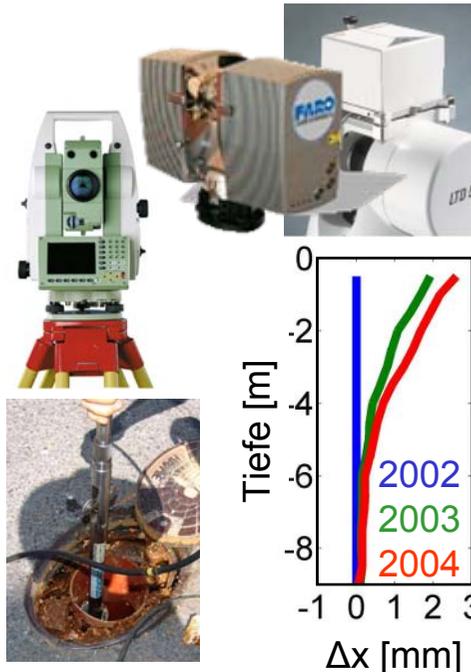
■ Monitoring

- Bauwerke



■ Instrumente

- Totalstationen
- Laserscanner
- Lasertracker
- Bohrloch-
inklinometer
- ...



■ Maschinensteuerung

- Baumaschinen
- TBM
- ...



■ Herausforderungen

- Kinematischer Betrieb
 - dynamisches Verhalten
 - Ansprechzeit
 - Störeinflüsse

- Neigungswinkel (Genauigkeit) unter jeglichen Bedingungen

Faseroptischer Neigungsmesser (FO-NM)

Spezifikationen

- Arbeitsbereich: $\pm 30^\circ$
- Präzision (kin.): 0.01° *)

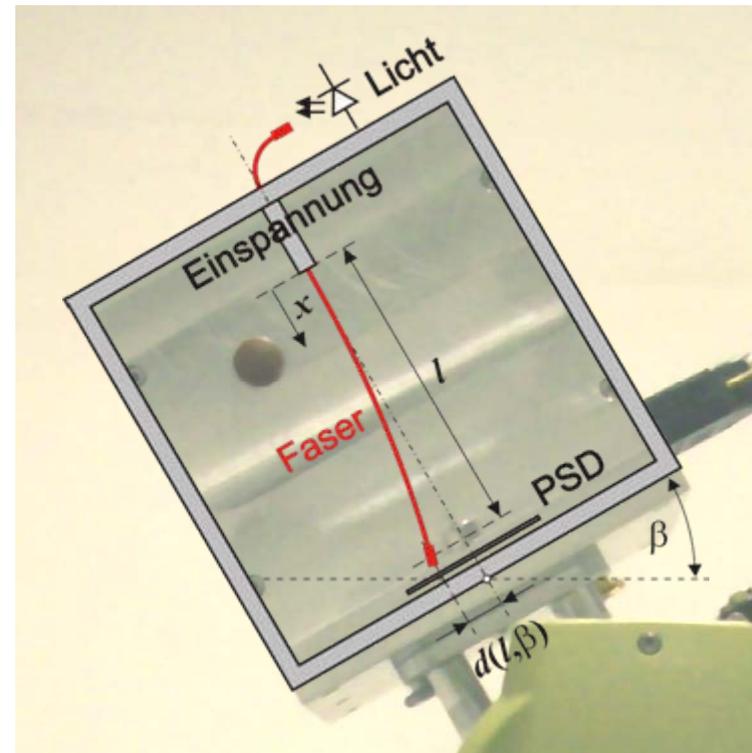
Messprinzip

- Sensorelement
 - einseitig eingespannte Glasfaser
 - freies Ende: Auslenkungen d bei Neigung
 - Masse am freien Ende ($d \rightarrow \gg$)
 - Licht in der Faser
 - Lichtpunkt (2D Position) am Detektor
- Positionsdetektor
 - PSD (2D)
 - Größe: $8 \times 8 \text{ mm}^2 \rightarrow \sigma_d \approx 1 \mu\text{m}$ für 0.01°

*) 1.7 mm / 10 m

Vorteile

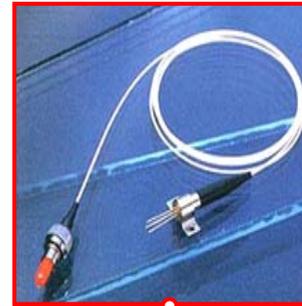
- einfaches Prinzip
- kein Gelenk für Pendel erforderlich
- Neigungsmessung in 2 Achsen



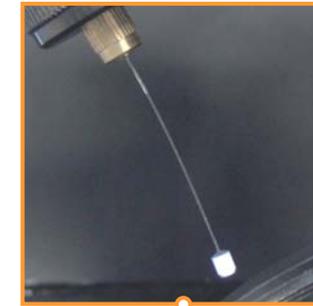
Versuchsmuster: Hardware

▪ Komponenten

- Lichtquelle
 - Pigtail Laser Diode
- FO Sensorelement
 - SMF, Polyimid-Coating
 - Masse: Zirkonia Ferrule
- Positionsdetektor
 - Hamamatsu PSD
 - Hamamatsu DAQ-Board
- Gehäuse
 - Aluminiumlegierung
 - stabile Fasereinspannung
 - Dreipunktlagerung



$\lambda = 650 \text{ nm}$
 $P = 1 \text{ mW}$

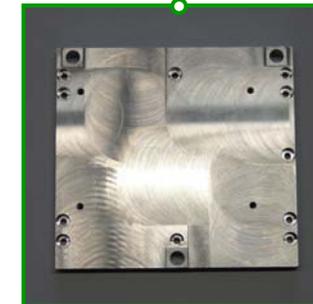
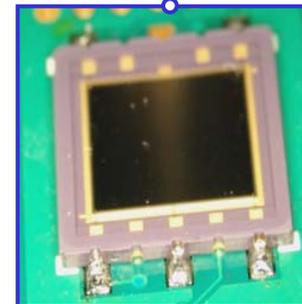


$l = 30.15 \text{ mm}$
 $m = 80 \text{ mg}$
 $d = 155 \mu\text{m}$



$\lambda = 320 - 1100 \text{ nm}$
 $A = 8 \times 8 \text{ mm}^2$
 $t_R = 2 \mu\text{s}$

$116 \times 110 \times 120 \text{ mm}^3$



Sensorelement: Modellierung (1)

▪ Bewegungsgleichung

• Sensorelement

- Balken (Biegesteifigkeit EI , Balkenmasse m_b , Punktmasse m_p)
- eine Achsrichtung: Auslenkung $u(x,t)$

• Biegeschwingung: Partielle Differentialgleichung

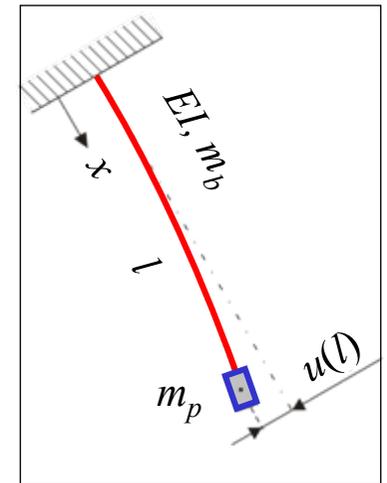
$$\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \frac{\rho A}{EI} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

• Lösung aus Elastostatik bekannt

$$u(x,t) = \underbrace{(C_1 \cos \kappa x + C_2 \sin \kappa x + C_3 \cosh \kappa x + C_4 \sinh \kappa x)}_{\text{Position}} \cdot \underbrace{\cos(\omega t + \varphi)}_{\text{Zeit}}$$

• Charakteristische Gleichung für κl (Rand-, Anfangsbedingungen)

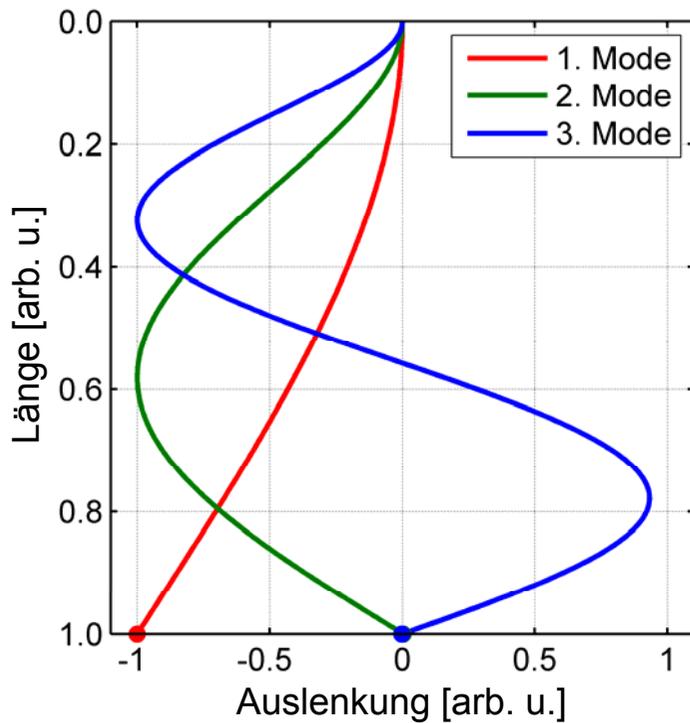
$$\underbrace{1 + \cosh \kappa l \cos \kappa l}_{\text{Balken}} + \underbrace{\varepsilon \kappa l (\sinh \kappa l \cos \kappa l - \cosh \kappa l \sin \kappa l)}_{\text{Punktmasse}} = 0 \quad \varepsilon = \frac{m_p}{m_b}$$



Sensorelement: Modellierung (2)

▪ Eigenschwingungsformen

- Form der Balkenschwingung $U_k(x)$
- Auslenkungsbeiträge u_k der Moden



▪ Eigenfrequenzen

$$\omega_k = K_k^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

▪ Simulationsergebnisse

- Einschränkung: PSD ($u_{max} = 4 \text{ mm}$)
- $l = 30 \text{ mm}$, $m_p = 80 \text{ mg}$
- $f_1 = 6.4 \text{ Hz}$
- $u_1 = 3.248 \text{ mm}$
- Moden $k > 1$ vernachlässigbar ($m_p > m_b$)

$$u_{2..n} < 0.01\%$$

$$f_{2..n} > 400 \text{ Hz}$$

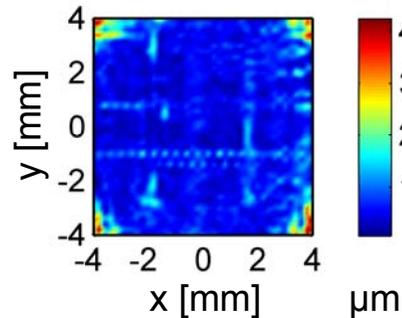
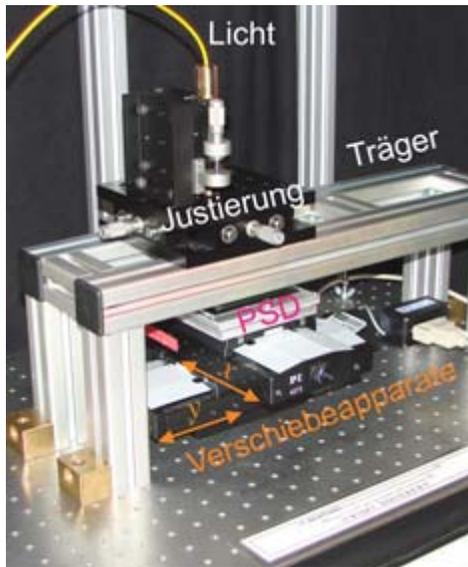
▪ Erweiterung auf 2D

- Auslenkungen $u(t)$, $v(t)$
- Positionsmessung mit PSD

Versuchsmuster: Kalibrierung

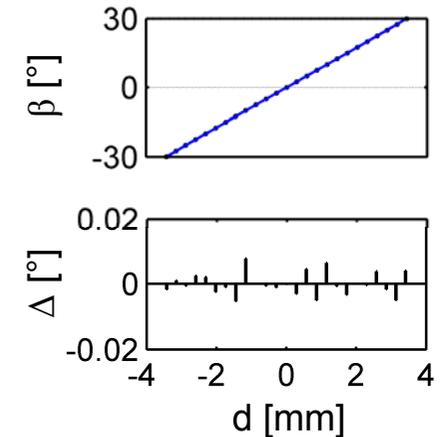
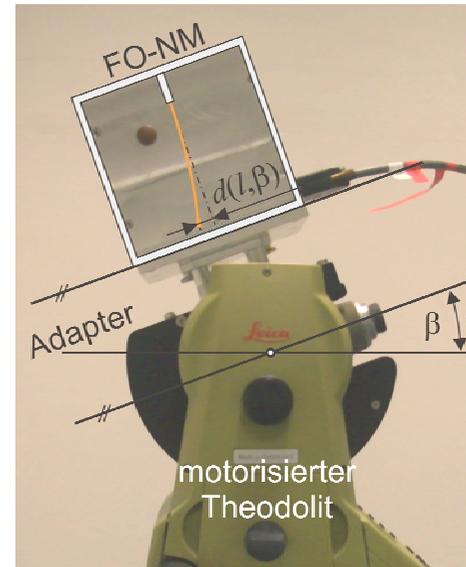
▪ Positionskalibrierung

- Einrichtung
 - Referenzpositionen ($1 \mu\text{m}$)
 - PSD Positionen (Nichtlinearität)
- Ergebnisse
 - Residuen $< 1 - 2 \mu\text{m}$



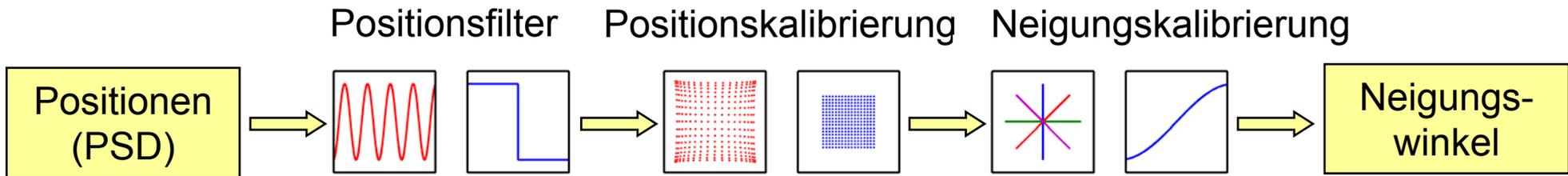
▪ Neigungskalibrierung

- Einrichtung
 - Referenzneigungen (0.001°)
 - Faserauslenkungen d (in Richtung α)
- Ergebnisse
 - Residuen $< 0.01^\circ$



Versuchsmuster: Signalverarbeitung

▪ Signalverarbeitungsschritte



▪ Filterung

- Unterdrückung der Biegeschwingung: $f = 6.4$ Hz
- Anwendungstyp „standard“

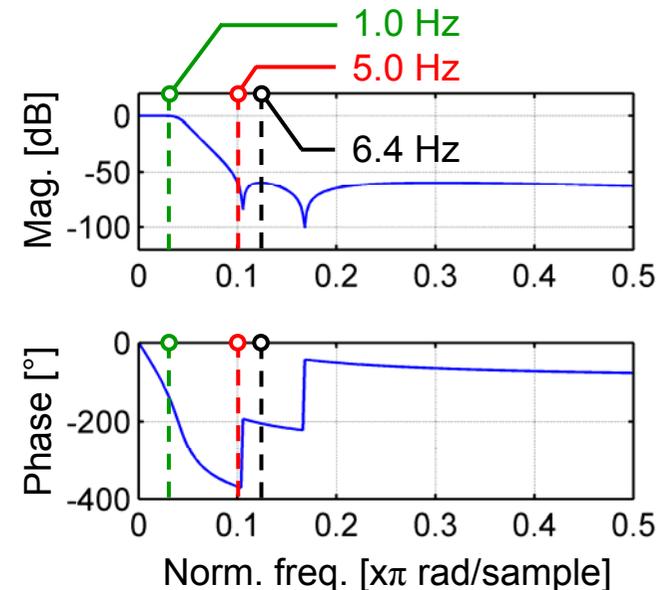
$$f_c: \quad 1.0 \text{ Hz}$$

$$f_c + \Delta f: \quad 5.0 \text{ Hz}$$

$$\delta_1: \quad 0.002 \text{ dB}$$

$$1 - \delta_2: \quad -60 \text{ dB}$$

- Chebyshev II Filter, $N = 5$, kurze Ansprechzeit



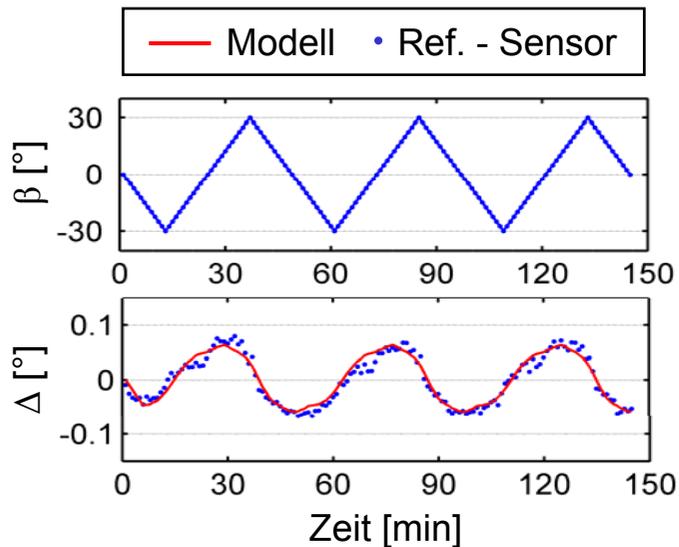
Experimentelle Ergebnisse

▪ Quasi-statisches Experiment

- wiederholte Neigungsänderungen
- Inkremente: 2.5° , Ruhezeit: 1 min

▪ Ergebnisse

- systematische Effekte
- Wiederholbarkeit: $< 0.02^\circ$
- Hysteresekompensation: **STD $< 0.02^\circ$**

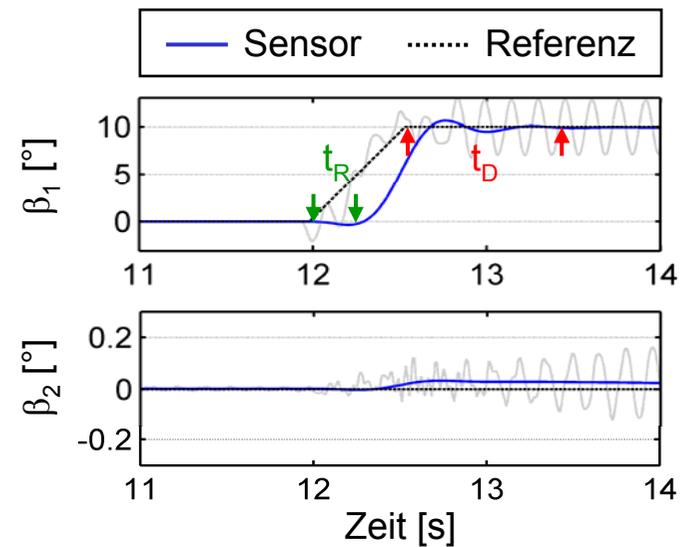


▪ Kinematisches Experiment

- schnelle Neigungsänderung ($\Delta\beta_1$): 0.5 s

▪ Ergebnisse

- Ansprechzeit: **$t_R = 0.25$ s *)**
- Überschwingen: 0.62° (6.2 % $\Delta\beta_1$)
- Abklingzeit: **t_D ($< 0.05^\circ$): 0.9 s**
- Komponente β_2 : Einfluss $< 0.04^\circ$



*) MOBA Dual Axis Slope S.: 0.9 s

Erweitertes Konzept: 2. Sensorelement

▪ Ziel

- Eignung für höhere Kinematik
- Vorteile aus 2 Fasern
 - „genauer aber langsamer“ vs.
 - „weniger genau aber schneller“

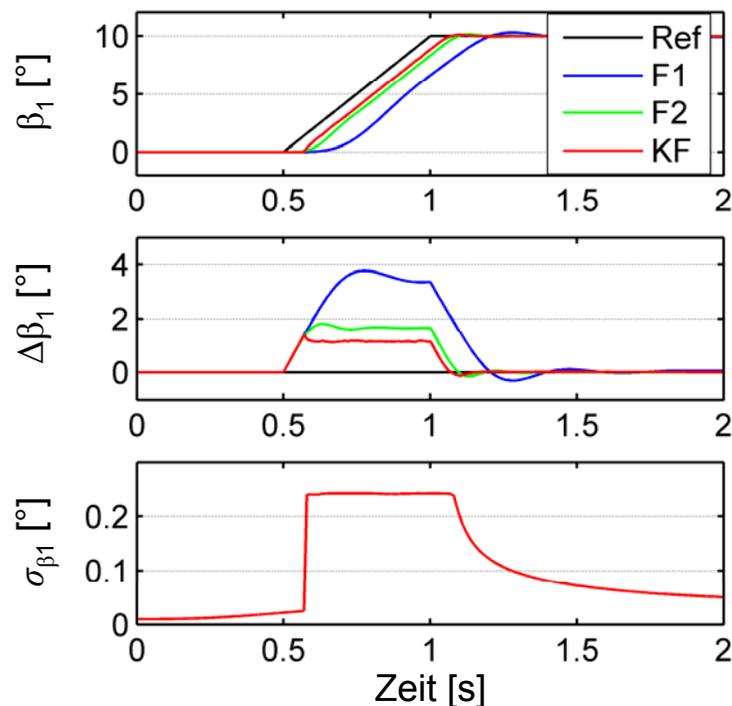
▪ Design (Variante)

- Faser 1 (wie bisher)
 - $l = 30 \text{ mm}$, $m_p = 80 \text{ mg}$
 - $f = 6.4 \text{ Hz}$
 - $t_R = 0.25 \text{ s}$
- Faser 2 (zusätzlich)
 - $l = 19 \text{ mm}$, $m_p = 80 \text{ mg}$
 - $f = 12.8 \text{ Hz}$
 - $t_R = 0.13 \text{ s}$

▪ Datenfusion: Kalman-Filter

- Analyse der Innovationen
- Anpassung des Systemrauschens (adaptives Filter)

▪ Beispiel



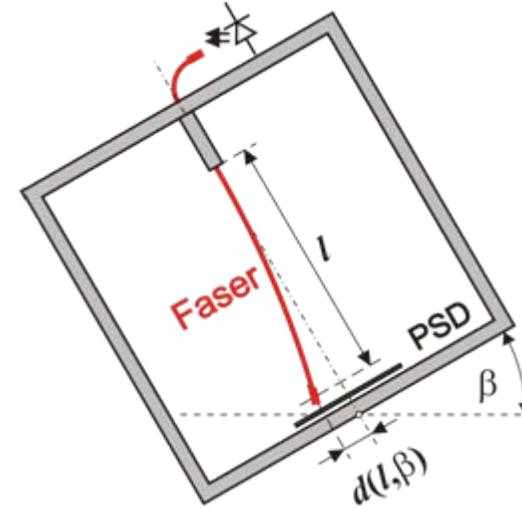
$$t_R = 0.07 \text{ s}$$

$$t_D = 0.15 \text{ s}$$

Faseroptischer Neigungsmesser

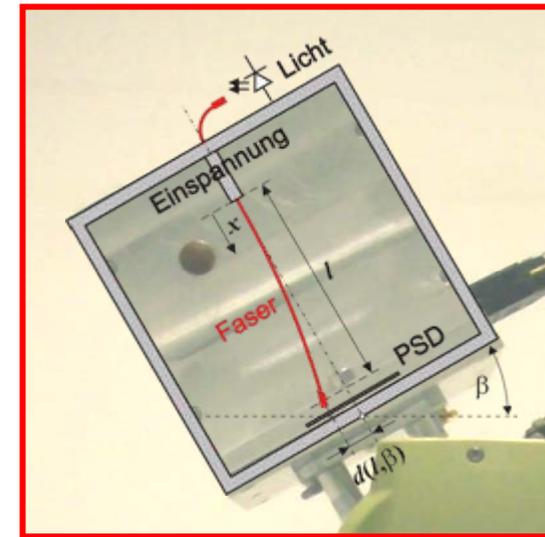
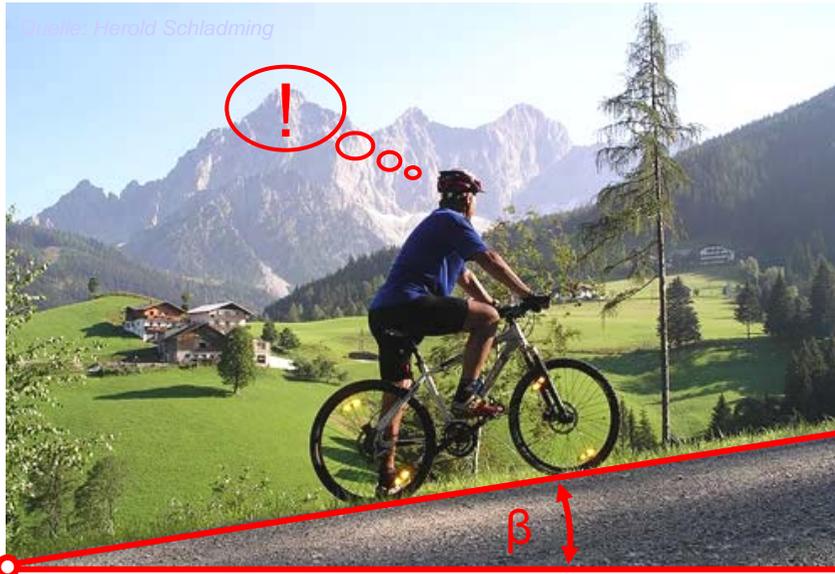
▪ Schlussfolgerungen

- Sensorprinzip geeignet für Neigungsmessung
- Versuchsmuster geeignet für unterschiedliche Anwendungen
- erreichbare Genauigkeiten
 - STD = 0.015° für gesamten Arbeitsbereich (Hysteresekompensation)
 - $\Delta < 0.05^\circ$ bei kinematischen Situationen nach ca. 1 s
- Simulation: zwei Sensorelemente
 - unterschiedliche Designparameter
 - adaptive Filterung
 - realistische Schätzung der Neigungen



▪ Ausblick: erweitertes Sensorkonzept

- mehrere verteilte Sensorelemente
- mögliche Basis für kreiselfreies INS
- Verwendung von Neigungs- und Beschleunigungsdaten



Eine Glasfaser als Sensorelement: Entwicklung eines faseroptischen Zweiachs-Neigungssensors

Klaus MACHEINER

